الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electronique
Option : Microélectronique et hyperfréquences

Réf : …………

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS

Présenté par :

Kalache Salim

Soutenu le : 01 Juin 2017

Devant le jury composé de :

Mme Terghini Warda	M.C.B	Président
Mme Tobbeche Souad	Pr.	Encadreur
Mme Ouarhlent Saloua	M.A.A	Examinateur

Année universitaire : 2016 / 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electronique
Option : Microélectronique et hyperfréquences

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS

Présenté par :

Kalache Salim

Avis favorable de l'encadreur :

Tobbeche Souad *Signature*

Avis favorable du Président du Jury

Terghini Warda

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electronique
Option : Microélectronique et hyperfréquences

Thème :

Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS

Proposé par : Pr. Tobbeche Souad
Dirigé par : Pr. Tobbeche Souad

Résumé

Le travail de ce mémoire de master est une étude par simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire en couches minces et à hétérojonction à base de CIGS. En premier lieu, nous avons simulé deux cellules solaires de structures : ZnO/CdS(n)/CIGS(p)/Mo et ZnO/ZnS (n)/CIGS(p)/Mo en utilisant le logiciel Silvaco Atlas-2D. La cellule solaire avec la couche tampon ZnS donne le meilleur rendement η=23.54% par rapport à la cellule solaire avec la couche tampon en CdS, η=22.60%. En deuxième lieu, nous avons optimisé la cellule solaire en ZnS/CIGS en étudiant l'effet du dopage et de l'épaisseur des couches en ZnS et CIGS. Le rendement optimal obtenu est de 26.82% pour des épaisseurs des couches en ZnS et CIGS de l'ordre de 25 nm et 4 µm respectivement et dopés par des concentrations de l'ordre 6×10^{17} et 10^{18} cm^{-3} respectivement.

ملخص

عملنا في أطروحة الماستر هو دراسة عن طريق المحاكاة العددية للخصائص الكهربائية للخلية الشمسية ذات الطبقات الرقيقة والوصلة المباشرة المستندة على CIGS. أولا قمنا بمحاكاة اثنان خلايا الشمسية المتشكلة من: ZnO/CdS(n)/CIGS(p)/Mo و ZnO/ZnS(n)/CIGS(p)/Mo باستخدام برنامج Silvaco Atlas-2D. الخلايا الشمسية مع طبقة مجابهة من ZnS تعطي أفضل مردود تحويلي η= 23.54%، بالمقارنة الخلايا الشمسية مع طبقة مجابهة من CdS تعطي مردود تحويلي η=22.60%، ثانيا، لقد قمنا بتحسين الخلية الشمسية ZnS/CIGS من خلال دراسة تأثير تركيز وسمك طبقات ZnS و CIGS. حصلنا على أعلى مردود تحويلي η= 26.82%، من أجل سمك كل طبقة من ZnS و CIGS المقدر ب 25 نانومتر و 4 مايكرومتر على التوالي و تركيز المقدر ب 6×10^{17} سم$^{-3}$ و 1×10^{18} سم$^{-3}$ على التوالي.

Sommaire

Sommaire

Dédicace..I

Remerciement..II

Liste des tableaux...IV

Liste des figures...VI

Liste des Symboles & Abréviations..X

Introduction générale..2

Références de l'introduction générale..4

Chapitre I

Propriétés Du Matériau CIGS

I.1 Introduction...6

I.2 Conducteurs - Isolants - Semi-conducteurs..6

I.3 Semi-conducteurs intrinsèques...8

I.4 Semi-conducteurs extrinsèques..9

I.4.1 Semi-conducteurs du type n..9

I.4.2 Semi-conducteurs du type p..10

I.5 Propriétés du matériau CIGS...11

I.5.1 Structure de CIGS...11

I.5.2 Ajustement de la bande d'énergie interdite...13

I.5.3 Propriétés optiques..13

I.6 Les techniques d'élaboration du matériau CIGS..17

I.6.1 Evaporation à partir des sources élémentaires...18

I.7 Conclusion...19

Références du chapitre I...20

Chapitre II
La Cellule Solaire en CIGS

II.1 Introduction..23

II.2 Rayonnement solaire...23

II.3 Énergie solaire photovoltaïque..25

II.4 Génération de porteurs en excès par la lumière..26

II.5 Mécanismes de recombinaison..27

II.6 Interaction rayonnement/semi-conducteur...30

II.7 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.................................32

II.8 Caractéristique I (V) et schéma équivalent d'une cellule solaire.......................33

II.9 Paramètres d'une cellule solaire...35

II.9.1 Courant de court-circuit, I_{cc}..35

II.9.2 Tension de circuit ouvert, V_{co}..35

II.9.3 Facteur de forme, FF..36

II.9.4 Rendement de conversion, η..36

II.9.5 Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque..................................37

II.10 Cellule solaire en couche-mince..38

II.10.1 Filière silicium en couches minces...38

II.10.2 Filière tellurure de cadmium (CdTe)..40

II.10.3 Filière Cu(In,Ga)Se_2..40

II.10.4 Multi-jonctions en couches minces...41

II.11 Cellule solaire en CIGS..42

II.12 Structure de la cellule CIGS...42

II.12.1 Substrat...43

II.12.2 Contact arrière...43

II.12.3 Absorbeur en CIGS...44

II.12.4 Couche tampon en CdS..44

II.12.5 Couche fenêtre en ZnO..45

II.12.6 Jonction p-n et diagramme d'énergie...46

II.13 Contenu de Ga dans la cellule solaire en CIGS...47

II.14 Avantages de la fabrication des cellules solaires en CIGS..49

II.14.1 Fabrication peu coûteuse...49

II.14.2 Flexible...50

II.14.3 Poids léger...50

II.14.4 Etat actuel de la technologie...50

II.15 Conclusion...51

Références du chapitre II...52

Chapitre III

Le Simulateur Atlas-Silvaco

III.1 Introduction...58

III.2 Présentation du package des programmes SILVACO..58

III.2.1 Les outils de simulation...60

III.2.2 Les outils interactifs 60

III.3 Présentation d'ATLAS...61

III.4 Commandes dans un programme ATLAS...62

III.4.1 Spécification de la structure..63

III.4.2 Spécification des modèles physiques...66

III.4.3 Sélection de la méthode numérique...68

III.4.4 Spécification des solutions...69

III.4.5 Analyse des résultats...69

III.5 Les équations de Base de Semi-conducteur en ATLAS-SILVACO.................................70

III.6 Conclusion...71

Références du chapitre III..72

Chapitre IV
Résultats et Discussions

IV.1 Introduction..74

IV.2 Cellule solaire en CdS/CIGS...74

IV.2.1 Structure de la cellule en CdS/CIGS...74

IV.2.2 Propriétés des différents matériaux de la cellule solaire..76

IV.2.3 Modélisation physique de la cellule solaire dans Atlas..77

IV.3 Résultats de simulation de la cellule solaire en CdS/CIGS...78

IV.4 Résultats de simulation de Cellule solaire en ZnS/CIGS...81

IV.5 Comparaison entre deux cellules en CdS/CIGS et ZnS/CIGS..83

IV.5 Effets des couches en ZnS et CIGS sur les performances de la cellule solaire..................85

IV.5.1 Effet du dopage des couches en ZnS et CIGS...85

IV.5.2 Effet de l'épaisseur des couches en ZnS et CIGS...88

IV.6 Conclusion..91

Références du chapitre IV..92

Conclusion générale..95

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents.

Mes frères et mes sœurs.

Toute ma famille.

Tous mes amis.

Tous mes collègues.

Tous ceux qui m'ont aidé pour accomplir ce mémoire.

Tous les professeurs qui nous ont enseigné car si nous sommes là aujourd'hui c'est bien grâce à vous tous, donc un grand merci pour vous.

Salim Kalache



Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je tiens spécialement à remercier Pr. Tobbeche Souad d'avoir accepté mon encadrement, de son intérêt constant qui m'a guidé dans mon travail, et de ses conseils au cours de mon travail.

J'adresse mes vives reconnaissances à tous les enseignants et le personnel du département de Génie-Electrique filière électronique et spécialement les enseignants de la spécialité microélectronique, sans oublier les étudiants de master électronique et électrotechnique.

Enfin, nous remerciements les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce modeste travail.

Salim Kalache

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1	Exemples de semi-conducteurs	7
Tableau II.1	Paramètres physiques des matériaux de la cellule solaire en CIGS	47
Tableau IV.1	Paramètres de simulation la cellule solaire en CIGS	76
Tableau IV.2	Paramètres de la densité de défauts des matériaux en ZnO, CdS et CIGS	77
Tableau IV.3	Comparaison entre les paramètres photovoltaïques simulés et obtenus expérimentalement des cellules solaires en CdS/ CIGS	80
Tableau IV.4	Paramètres de simulation la cellule solaire en CIGS	82
Tableau IV.5	Comparaison entre les cellules en CdS et en ZnS	84
Tableau V	Paramètres optimum ayant donné η=26.82%	96

List des figures

Liste des figures

Chapitre I
Propriétés Du Matériau CIGS

Figure I.1 Populations des porteurs du S.C. intrinsèque et niveau de Fermi......................8

Figure I.2 Libération d'un électron par l'atome de phosphore et schéma des bandes..9

Figure I.3 Libération d'un trou par l'atome de bore et schéma des bandes......................10

Figure I.4 Structure cristalline de la chalcopyrite...11

Figure I.5 Largeurs de bande interdite et paramètre de maille *a* de certaines chalcopyrites...12

Figure I.6 Coefficient d'absorption des différents matériaux..14

Figure I.7 Coefficient d'absorption de $CuInSe_2$ et $CuInGaSe_2$ en fonction de longueur d'onde..15

Figure I.8 Variation de l'énergie du gap de $CuInSe_2$ en fonction de la température...16

Figure I.9 L'évolution de l'indice de réfraction *n* et le coefficient d'extinction *k* du CIGS en fonction de la longueur d'onde...17

Figure I.10 Principe de la technique de la coévaporation thermique pour la couche CIGS..18

Figure I.11 Flux de métaux et profil de température de substrat utilisés dans un procédé en trois étapes de synthèse du CIGS par coévaporation......................................19

Chapitre II
La Cellule Solaire en CIGS

Figure II.1 Radiation spectral pour différent air masses...24

Figure II.2 Spectre solaire et la réponse des matériaux CIGS...25

Figure II.3 Principaux mécanismes de recombinaison dans un semiconducteur : Shockley-Read-Hall (SRH), radiative et Auger..27



Figure II.4 Transitions bande à bande dans un semiconducteur (a) à bande interdite directe et (b) à bande interdite indirecte......31

Figure II.5 Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire......32

Figure II.6 Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque......34

Figure II.7 Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque......34

Figure II.8 Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire......37

Figure II.9 Cellule solaire au silicium amorphe......39

Figure II.10 Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire en silicium amorphe (a) Courbe réelle, (b) Courbe simulée......39

Figure II.11 Cellule solaire au tellurure de cadmium......40

Figure II.12 Caractéristique courant-tension d'une cellule CIGS......41

Figure II.13 Principe de la cellule solaire multi-jonctions......42

Figure II.14 (a) schéma de l'empilement des différentes couches d'une cellule en CIGS, (b) image de la tranche d'une cellule en CIGS obtenue par un microscope électronique à balayage (MEB) 43

Figure II.15 Structure de bande d'une cellule solaire Cu (In, Ga) Se_2......46

Figure II.16 Réponse spectrale d'une cellule en CIGS pour différentes proportions x de Ga......48

Figure II.17 Caractéristiques I-V pour trois bandes interdites différentes......48

Figure II.18 Le processus de fabrication " roll-to-roll " de la cellule solaire CIGS......50

Figure II.19 Meilleurs rendements des cellules solaires du laboratoire NREL en fonction du temps......51

Chapitre III

La Simulateur Atlas-Silvaco

Figure III.1 Organigramme de la structure VWF......59

Figure III.2 Entrées/sorties du simulateur Atlas......61

Figure III.3 Les commandes fondamentales dans un programme ATLAS......62



Figure III.4 Maillage du dispositif..63

Figure III.5 Définition des régions et des matériaux par le logiciel ATLAS..................64

Figure III.6 Définition des électrodes par le logiciel ATLAS..65

Figure III.7 Distribution du dopage dans une structure par le logiciel ATLAS..............66

Chapitre IV

Résultats et Discussions

Figure IV.1 Structure bidimensionnelle d'une cellule solaire en CdS/CIGS simulée dans Atlas-Silvaco..75

Figure IV.2 Structure en coupe d'une cellule CIGS, (a) Image au microscope à Balayage, (b) schéma..78

Figure IV.3 Caractéristiques I(V) et P(V) expérimentales d'une cellule solaire en CIGS..79

Figure IV.4 Caractéristiques I(V) et P(V) simulées d'une cellule solaire en CIGS............80

Figure IV.5 Structure bidimensionnelle d'une cellule solaire en ZnS/CIGS.....................81

Figure IV.6 Caractéristiques I(V) et P(V) de simulation d'une cellule solaire en ZnS/CIGS..83

Figure IV.7 Courbe J-V de cellules en CdS/CIGS et en ZnS/CIGS..................................84

Figure IV.8 L'effet du dopage des couches en ZnS et CIGS sur les paramètres (Jcc, Vco, FF, η) de la cellule solaire...86-87

Figure IV.9 L'effet de l'épaisseur des couches en ZnS et CIGS sur les paramètres (J_{cc}, V_{co}, FF, η) de la cellule solaire...89-90



Liste des Symboles & Abréviations

Liste des Symboles & Abréviations

Abréviations

AM	**A**ir **M**asse.
a-Si :H	**Si**licium **a**morphe **H**ydrogéné.
CBD	**C**hemical **B**ath **D**eposition.
CdS	**S**ulfure de **C**a**d**mium.
CdTe	**T**ellurure de **C**a**d**mium .
CGS	**S**éléniure de **C**uivre et de **G**allium.
CIGS	**C**uivre-**I**ndium/**G**allium-**S**élénium.
CIS	**S**éléniure de **C**uivre et **d**'Indium.
GUI	**G**raphical **U**ser **I**nterface.
IEC	**I**nternational **E**lectrotechnical **C**ommission.
ISA	**I**nternational **S**olar **A**lliance.
ITO	**O**xyde d'**I**ndium dopé à l'étain.
MEB	**M**icroscope **E**lectronique à **B**alayage.
Mo	**Mo**lybdène.
MEB	**M**icroscope **E**lectronique à **B**alayage.
Mo	**Mo**lybdène.
NREL	**L**aboratoire **N**ational des **E**nergies **R**enouvelables.
PVD	**P**hysical **V**apor **D**eposition.
SDL	**S**urface **D**efect **L**ayer.
SILVACO	**Sil**icon **V**alley **C**o**r**poration.
SRH	**S**hockley-**R**ead-**H**all.

TCAD **T**echnology **C**omputer **A**ided **D**esign.

TCO **O**xyde **T**ransparent **C**onducteur.

VWF **V**irtual **W**afer **F**ab.

ZnO **O**xyde de **Zin**c.

ZnS **S**ulfure de **Zin**c.

ZSW Centre de recherche pour l'énergie solaire et l'hydrogène.

Symboles

A La constante du matériau.

B Le coefficient de recombinaison radiative

C_p Le coefficient de recombinaison Auger.

E L'énergie d'irradiation (eV).

D_n Coefficient de diffusion des électrons ($cm^2.s^{-1}$).

D_p Coefficient de diffusion des trous ($cm^2.s^{-1}$).

E_C Niveau inférieur de la bande de conduction (eV).

E_F Niveau de fermi (eV).

E_g Largeur de la bande interdite (eV).

E_p L'énergie de piège (eV).

E_t L'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite (eV).

E_V Niveau supérieur de la bande de valence (eV).

EQE Le rendement quantique externe (%).

FF Le facteur de forme (%).

G Le taux de génération ($cm^{-3}s^{-1}$).

h La constante de Planck (6.62×10^{-34} J.s).

I	Le courant (A).
I_0	Le flux de photons (cm^{-2}s^{-1}).
I_{cc}	Le courant de court-circuit (mA).
I_{max}	Le courant maximale (A).
I_{obs}	Le courant d'obscurité (mA).
I_{ph}	Le photocourant (mA).
I_s	Le courant de saturation (mA).
IQE	Le rendement quantique interne (%).
I(x)	Intensité du flux au point x (cm^{-2}s^{-1}).
J_{cc}	La densité du courant de court-circuit (mA/cm^2).
J_n	La densité du courant des électrons (mA/cm^2).
J_p	La densité du courant des trous (mA/cm^2).
K	La constante de Boltzmann (8, 6 .10^{-5} eV K^{-1}).
k	Le coefficient d'extinction.
m_0	Masse de l'électron libre (9,11×10^{-31} Kg).
m_e	Masse effective des électrons (Kg).
m_h	Masse effective des trous (Kg).
N	L'indice optique complexe.
n	La concentration des électrons (cm^{-3}).
n	L'indice de réfraction.
n_i	La concentration intrinsèque (cm^{-3}).
n_0	La densité d'électrons à l'équilibre (cm^{-3}).
N_a	La concentration des atomes accepteurs (cm^{-3}).
N_A^-	La concentration des atomes accepteurs ionisées (cm^{-3}).

N_C	La densité d'états des électrons dans la bande de conduction (cm^{-3}).
N_d	La concentration des atomes donneurs (cm^{-3}).
N_D^+	La concentration des atomes donneurs ionisées (cm^{-3}).
N_p	La densité de pièges (cm^{-3}).
N_V	La densité d'états des trous dans la bande de valence (cm^{-3}).
n_s	Les concentrations des électrons à la surface (cm^{-3}).
p	La concentration des trous (cm^{-3}).
p_0	La densité de trous à l'équilibre thermodynamique (cm^{-3}).
P	La puissance (W).
P_{max}	La puissance maximale (W).
p_s	Les concentrations des trous à la surface (cm^{-3}).
q	La charge élémentaire (1.6×10^{-19} C).
R	Le coefficient de réflexion (%).
R_{Auger}	Le taux de recombinaisons Auger ($cm^{-3}s^{-1}$).
R_n	les taux de recombinaisons pour les électrons ($cm^{-3}s^{-1}$).
R_p	les taux de recombinaisons pour les trous ($cm^{-3}s^{-1}$).
R_s	La résistance série (Ω).
R_{sh}	La résistance shunt (Ω).
R_{SRH}	Le taux de recombinaisons SRH ($cm^{-3}s^{-1}$).
RS	La réponse spectrale (%).
S_n	Les vitesses de recombinaison en surface des électrons ($cm.s^{-1}$)
S_p	Les vitesses de recombinaison en surface des trous ($cm.s^{-1}$)
T	La température (K).
U_s	Le taux de recombinaison Shockley-Read-Hall en surface ($cm^{-3}s^{-1}$).

V	La tension (V).
V_{co}	La tension de circuit ouvert (V).
V_{max}	La tension maximale (V).
v_{th}	La vitesse thermique des électrons (cm.s^{-1}).
x	La fraction molaire de Ga (mol).
α	Le coefficient d'absorption (cm^{-1}).
c	La vitesse de la lumière dans le vide (3×10^{8} m.s^{-1}).
σ_n	La section efficace de capture des électrons.
ε	La permittivité du semi-conducteur (F.cm^{-1}).
ε_r	La permittivité relative.
$\frac{\partial n}{\partial t}$	Les taux de variation des densités des électrons avec le temps (cm^{-3}s^{-1}).
$\frac{\partial p}{\partial t}$	Les taux de variation des densités des trous avec le temps (cm^{-3}s^{-1}).
τ_n	Durée de vie des électrons (s).
τ_p	Durée de vie des trous (s).
$\tau_{SRH,n}$	Les temps de vie des électrons (s).
$\tau_{SRH,p}$	Les temps de vie des trous (s).
$\tau_{Rad,n}$	Le temps de vie des électrons vis-à-vis des recombinaisons Auger (s).
μ_n	La mobilité des électrons (cm^{2}.V^{-1}.s^{-1}).
μ_p	La mobilité des trous (cm^{2}.V^{-1}.s^{-1}).
η	Le rendement de conversion (%).
ν	La fréquence de radiation (Hz).
λ	La longueur d'onde de la lumière (µm).
χ_e	Affinité électronique (eV).

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés, elle est aussi, le pilier de l'économie moderne. Elle est l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins toujours accrus de l'industrie et des consommateurs, une des solutions les plus prometteuses pour la future énergétique de l'humanité, est le photovoltaïque (cellule solaire).

La cellule solaire est un composant électronique qui peut convertir la lumière du soleil en électricité, cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, qui ont comme propriété de libérer leurs porteurs de charge (électrons et trous) sous l'influence d'une excitation extérieure. Actuellement l'objectif de multiples recherches est de réaliser la meilleure cellule avec un haut rendement énergétique et un prix de revient bas. Pour diminuer à la fois le poids et le prix de ces dispositifs tout en augmentant leurs surfaces et leurs souplesses, des cellules en couches minces ont été réalisées.

Les cellules solaires en couches minces qui utilisent le séléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS) représentent l'approche la plus prometteuse au plan de réduction des coûts de production. L'avantage de ce matériau est son élaboration facile d'une part et excellente stabilité et une grande résistance aux rayonnements d'autre part [1, 2], cette cellule est caractérisée actuellement par un rendement très élevé de 22.6% et sa durée de vie est très élevée [3-5].

Le sulfure de cadmium (CdS) est largement utilisé comme couche tampon pour les cellules solaires en couche mince à base du CIGS. Le gap optique de CdS est de 2.42 eV, ce qui offre une large fenêtre d'absorption du rayonnement solaire sur la couche d'absorption en CIGS. Plus récemment, la recherche sur les cellules solaires en CIGS sans utiliser le matériau CdS a été intensifiée pour réduire les coûts de production et de recyclage et pour réduire la toxicité du cadium (Cd) [6, 7]. Compte tenu de ces facteurs, il y'a une compatibilité de la couche d'absorption en CIGS avec d'autres couches tampons à large bande interdite. Le sulfure de zinc (ZnS) préparé par dépôt de bain chimique (CBD) s'avère être une alternative attrayante au CdS en combinaison avec des absorbeurs de CIGS [8, 9] pour leur bande interdite large de l'ordre de 3.68 eV et non toxique pour l'environnement.

A cause des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se sont dirigés à l'utilisation de logiciels de simulation numérique telle que SILVACO pour prédire la réponse des structures à base de matériaux préparés pour la conversion photovoltaïque. Ces logiciels permettent des centaines de combinaisons de paramètres avant la fabrication réelle du dispositif. C'est un moyen rapide, consistant et pas cher pour le design de cellules solaires. Il permet, entre autre, la visualisation des paramètres qui influencent le comportement des cellules solaires.

L'objectif de ce présent mémoire est l'étude par simulation numérique de la cellule solaire à base de $Cu(In,Ga)Se_2$ pour deux couches tampon en CdS et en ZnS. Nous allons aussi simuler l'effet de l'épaisseur et le dopage des couches en ZnS et CIGS en vue d'optimiser la cellule solaire en CIGS.

Pour ce faire, notre travail est divisé en quatre chapitres comme suit :

- ✓ Dans le premier chapitre : nous allons présenter les propriétés physiques des semiconducteurs en générales et le semi-conducteur CIGS en particulier constituant la cellule solaire, et procédés d'élaboration de ses cellules.
- ✓ Le deuxième chapitre est une étude sur les cellules solaires en général et les cellules solaires en CIGS en particulier. Nous décrirons le principe de fonctionnement et les caractéristiques de ces cellules solaires.
- ✓ Le troisième chapitre présente le logiciel Silvaco utilisé pour la simulation de la cellule solaire.
- ✓ Et enfin, Dans le dernier chapitre nous présenterons et discuterons les résultats obtenus.

Bonne lecture

Références de l'introduction générale

[1] Ullal HS, Zweibel K, Von Roedern B, Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Anaheim, CA, USA; 1997, p. 301.

[2] M. Yamaguchi, "Radiation resistance of compound semiconductor solar cells", J. Appl. Phys, Vol 78, 1995, p1476.

[3] M. Kemell, Academic Dissertation, Université de Helsinki, Finland, (2003).

[4] M.A. Contreras, B. Egaas, K. Ramanathan, J. Hiltner, A. Swartzlander, F. Hasoon, R. Noufi, Prog. Photovolt. Res. Appl., 7 (1999) 311.

[5] Philip Jackson et al., "Effects of heavy alkali elements in Cu(In,Ga)Se_2 solar cells with efficiencies up to 22.6%" , ZSW, Germany, 2016.

[6] Siebentritt S, Kampschulte T, Bauknecht A, Blieske U, Harneit W, Fiedeler U and Lux-Steiner M 2002 Cdfree buffer layers for CIGS solar cells prepared by a dry process Sol. Energy Mater. Sol. Cells 70 447–57

[7] Ennaoui A, Blieske U and Lux-Steiner M C 1998 13.7% Efficient Zn(Se, OH)x/Cu(In, Ga)(S, Se)2 thin-film solar cell Prog. Photovolt. Res. Appl. 6 447–51

[8] Olopade M A, Oyebola O O and Adeleke B S 2012 Investigation of some materials as buffer layer in copper zinc tin sulphide(Cu2ZnSnS4) solar cells by SCAPS-1D Adv. Appl. Sci. Res. 3 3396–400

[9] Kobayashi T, Kumazawa T, Kao Z J L and Nakada T 2013 Cu(In, Ga)Se2 thin film solar cells with a combined ALD-Zn(O, S) buffer and MOCVD-ZnO:B window layers Sol. Energy Mater. Sol. Cells 119 129–33



Chapitre I

Propriétés Du Matériau CIGS

I.1 Introduction

Beaucoup de laboratoires de recherche à travers le monde travaillent sur les semi-conducteurs chalcopyrites pour comprendre les propriétés électroniques, structurales, élastiques, mécaniques et optiques de ces matériaux. Cet engouement à ces matériaux est dû à leurs propriétés optiques et électroniques intéressantes et à leurs diverses applications pratiques dans les cellules solaires, les détecteurs photovoltaïques et l'électronique. Ils servent de base surtout pour la cellule solaire ainsi que les modules et capteurs photovoltaïques. La recherche dans ce domaine a toujours comme but majeur d'améliorer le rendement électrique et quantique de ces cellules photovoltaïques à base de couches minces.

Le CIGS dans sa structure chalcopyrite possède des propriétés électroniques, électriques et optiques intéressantes. La bande interdite est de nature directe et son coefficient d'absorption qui est très élevé et de l'ordre de 10^5 cm^{-1} dans la gamme du spectre solaire. Le composé CIGS est considéré comme matériau semiconducteur important pour les applications optoélectroniques et photovoltaïques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la différence entre conducteurs, isolants et semi-conducteurs, les propriétés physiques des semiconducteurs en CIGS constituant la cellule solaire et les procédés d'élaboration.

I.2 Conducteurs - Isolants - Semi-conducteurs

Les matériaux ayant la plus faible résistivité à température ambiante, typiquement inférieure à 10^{-5} Ωcm, sont les métaux (cuivre, or, argent, aluminium...). La conduction électrique s'effectue essentiellement par les électrons libres dont la concentration diffère peu d'un métal à l'autre (de 10^{22} à 10^{23} cm^{-3}) quelle que soit sa pureté. Une augmentation de la température provoque une légère augmentation de la résistivité, pouvant s'expliquer par le fait que les électrons libres sont gênés dans leur déplacement par les vibrations (croissantes avec la température) des atomes du métal.

Les matériaux dont la résistivité est typiquement supérieure à 10^8 Ωcm sont considérés comme isolants ; c'est le cas pour le verre, le mica, la silice (SiO_2), le carbone (diamant). Cette fois l'augmentation de la température peut provoquer la libération d'électrons (ainsi que de ″trous″) qui peuvent participer à la conduction électrique, ce qui provoque une baisse de la résistivité avec la température.



Entre les métaux et les isolants se trouvent les semi-conducteurs (SC) dont la résistivité varie de 10^{-3} à 10^4 Ωcm (ou plus). La conduction électrique se fait par les électrons et les trous, ou de façon préférentielle par l'un ou l'autre type de porteurs. Un semi-conducteur peut être soit pur auquel cas il est dit ″intrinsèque″, soit dopé par des impuretés (qui permettent de contrôler sa résistivité) auquel cas il est dit ″extrinsèque″. Si on prend, par exemple, du Silicium assez pur et qu'on lui ajoute un atome de Bore ou de Phosphore pour 10^5 atomes de Silicium, sa résistivité passe de 10^3 à environ 10^{-2} Ωcm.

Le tableau I.1 donne des exemples de matériaux ou de composés semi-conducteurs en fonction des éléments qui les constituent et de la position de ces éléments dans le tableau de Mendeleïev.

Colonne		Semi-conducteur
IV		Ge. Si
III-V	Binaire	GaAs. GaP. GaSb. InAs. InP. InSb
	Ternaire	$Al_xGa_{1-x}As$, $GaAs_yP_{1-y}$
	Quaternaire	$Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$
II-VI	Binaire	CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
	Ternaire	$Cd_xHg_{1-x}Te$

Tableau I.1 : Exemples de semi-conducteurs.

I.3 Semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsque le cristal n'est pas pollué (volontairement ou non) par des impuretés pouvant changer la concentration en porteurs libres. A température constante, un équilibre s'établit (Fig.I.1) entre les phénomènes d'ionisation thermique et de recombinaison ; les électrons libres et les ions de silicium apparaissant en quantités égales. La concentration en électrons libres n et en trous libres p sont égales à n_i la concentration intrinsèque.

La mécanique statistique montre que la population des porteurs libres (n la concentration des électrons en cm^{-3} dans la bande de conduction et p la concentration des trous en cm^{-3} dans la bande de valence) s'exprime selon les lois :

$$n = N_C exp\left(-\frac{\Delta E_n}{KT}\right) \qquad p = N_V exp\left(-\frac{\Delta E_p}{KT}\right) \qquad \textbf{I.1}$$

Où N_C et N_V sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence. Ces deux coefficients évoluent avec la température selon une loi en T$^{3/2}$.

- ΔE_n et ΔE_p représentent deux différences d'énergies liées à un niveau dit de Fermi qui indique les écarts de population entre les électrons et les trous.

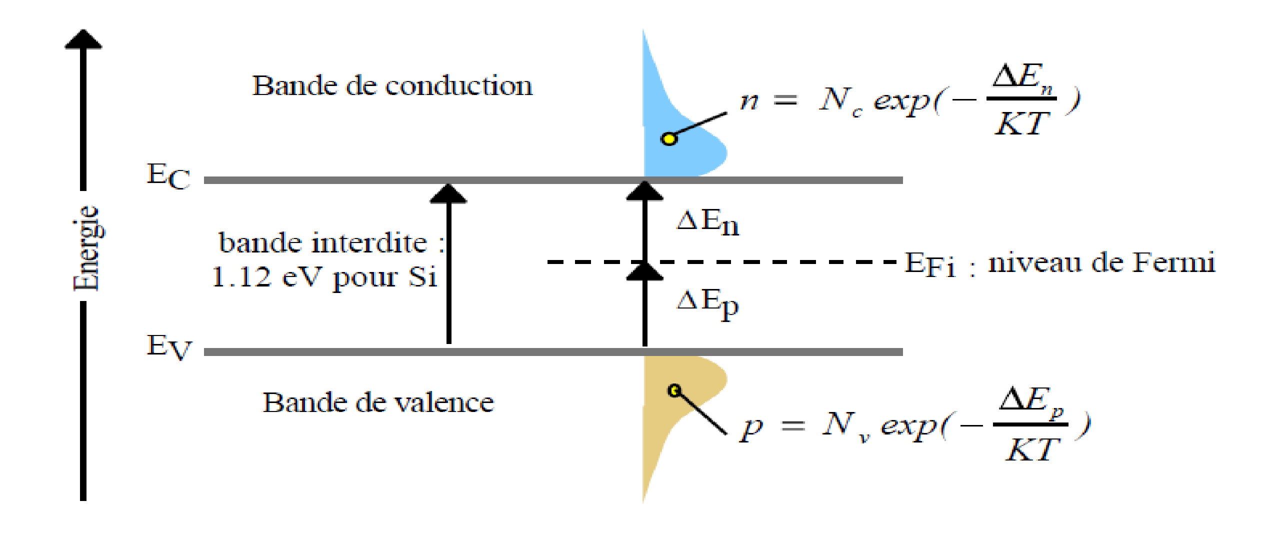


Fig.I.1 : populations des porteurs du S.C. intrinsèque et niveau de Fermi.

La concentration intrinsèque n_i en électrons libres et en trous libres par cm^{-3} dépend de la hauteur de bande interdite E_g et de la température T selon la loi :

$$n = p = n_i = AT^{\frac{3}{2}}.exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad \textbf{I. 2}$$

A : constante du matériau

E_g: hauteur de bande interdite (eV)

K : constante de Boltzmann = 8, 6 .10^{-5} eV K^{-1}

T : température absolue en K

I.4 Semi-conducteurs extrinsèques

I.4.1 Semi-conducteurs du type n

On obtient un S.C. de type n en injectant dans le cristal de silicium des atomes qui possèdent 5 électrons sur leur couche périphérique (phosphore ou arsenic de la 5° colonne de la classification) (figure I.2).

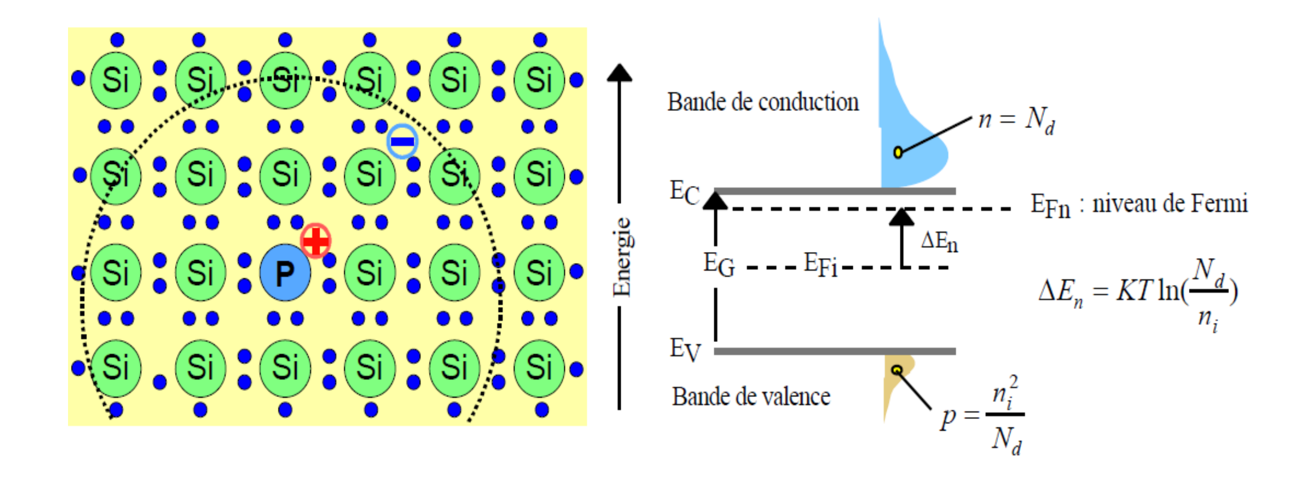


Fig.I.2 : libération d'un électron par l'atome de phosphore et schéma des bandes.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes donneurs sont ionisés.

Si N_d est la concentration des atomes donneurs, ceux-ci vont libérer $n = N_d$ électrons libres.

Les concentrations en électrons libres (n) et en trous libres (p) sont liées par la loi d'action de masse :

$$n.p = n_i^2 \qquad \textbf{I. 3}$$

Les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires.

Le niveau indicateur de Fermi E_{F_n} se déplace donc du milieu de la bande interdite (E_{F_i}) vers la bande de conduction de telle manière que :

$$\Delta E_n = KT.\ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \qquad \textbf{I. 4}$$

Avec : $\Delta E_n = E_{F_n} - E_{F_i}$

I.4.2 Semi-conducteurs du type p

On obtient un S.C. dopé p en injectant dans le silicium des atomes de la 3° colonne (bore, indium) qui possèdent trois électrons périphériques (figure I.3).

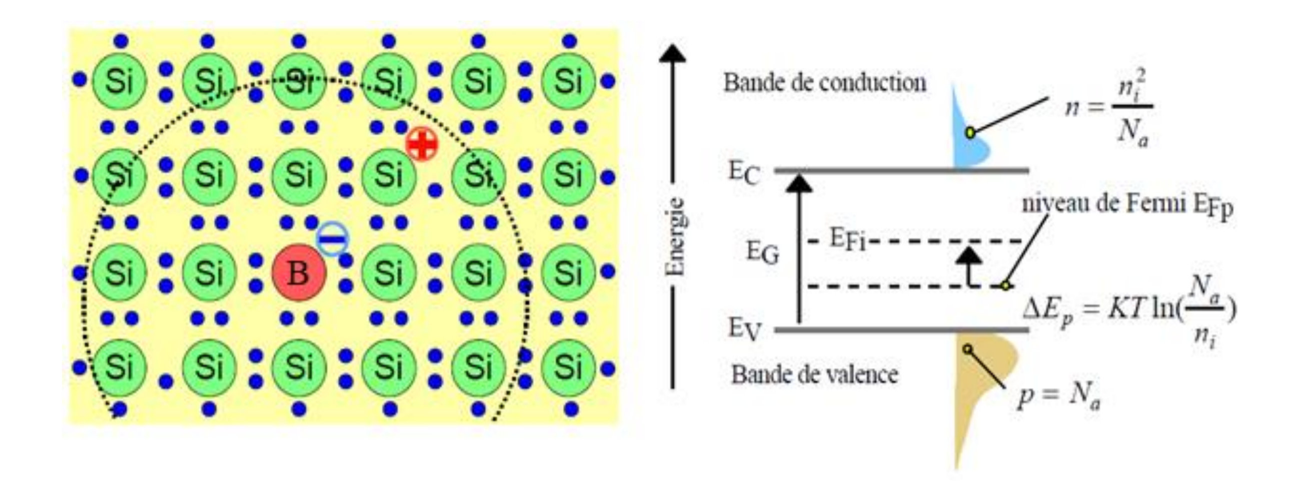


Fig.I.3 : Libération d'un trou par l'atome de bore et schéma des bandes.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes accepteurs sont ionisés. Si N_a est la concentration par cm^{-3} des atomes accepteurs, ceux-ci vont libérer : $p = N_a$ trous libres.

Les concentrations en électrons libres (n) et en trous libres (p) sont liées par la loi d'action de masse :

$$n.p = n_i^2 \qquad \textbf{I. 5}$$

Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires.

Le niveau indicateur de Fermi E_{F_p} se déplace du niveau intrinsèque E_{F_i} vers la bande de valence de telle manière que :

$$\Delta E_p = KT.ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \qquad \text{I. 6}$$

Avec : $\Delta E_p = E_{F_i} - E_{F_p}$

I.5 Propriétés du matériau CIGS

Le CIGS est le matériau clé dans les cellules CIGS dont il convient d'étudier les propriétés structurales et optoélectroniques.

I.5.1 Structure de CIGS

Le CIGS est un acronyme de séléniure de cuivre-indium gallium ($CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$) est un semi-conducteur quaternaire en solution solide ou x représente la portion du gallium. La concentration d'indium et de gallium peut varier du séléniure de cuivre et d'indium pur (x=0, CIS) à du séléniure de cuivre et de gallium pur (x=1, CGS). Ainsi, son gap varie continuellement avec x, de 1.0 eV pour CIS au environ de 1.7 eV pour le CGS. Cristallographiquement, le CIGS est un tétraèdre appartenant à la famille des I-III-VI_2 avec une structure de chalcopyrite (Fig.I.4).

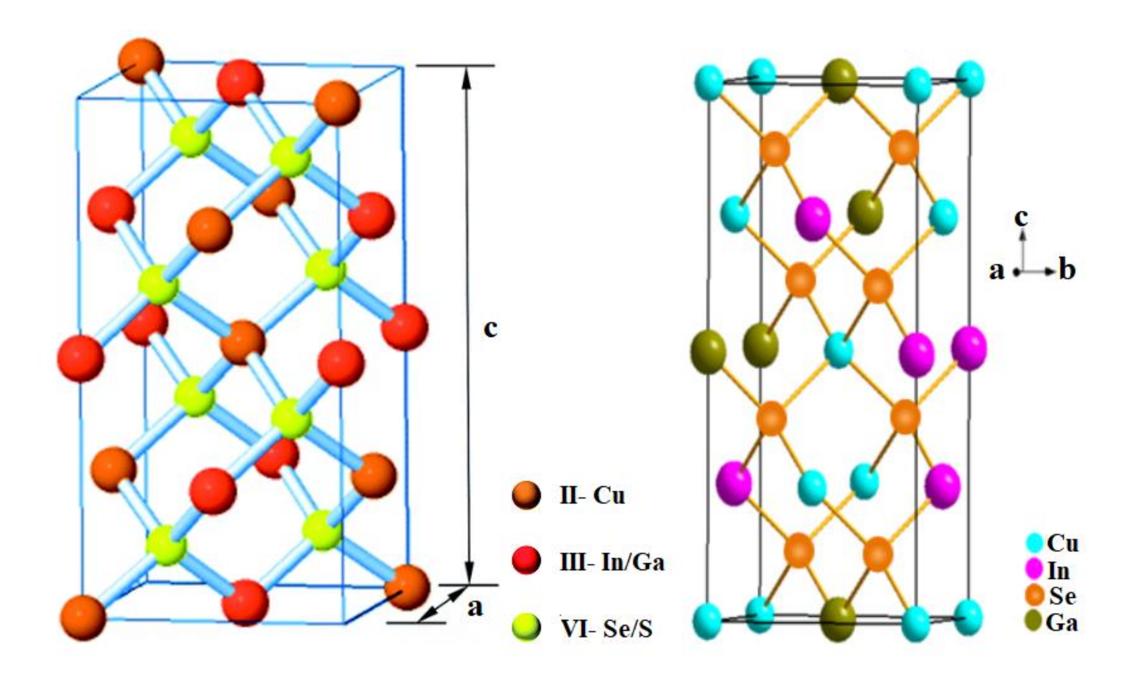


Fig.I.4 : Structure cristalline de la chalcopyrite [1,2].

Les paramètres de maille sont contrôlés par la composition du ternaire ($CuInSe_2$, $CuGaSe_2$, $CuInS_2$, $CuGaS_2$…), ils suivent la loi de Vegard [3-4]. Pour les chalcopyrites intégrant les atomes les plus petits (Ga au lieu de In, S au lieu de Se), la maille cristalline se contracte, donc le paramètre de maille *a* diminué (Fig.I.5), et inversement pour les atomes les plus gros.

Les variations de composition ont également une influence sur les valeurs de bande interdite, les énergies des bandes interdites varient entre 1,0 eV pour $CuInSe_2$ et 2,4 eV pour $CuGaS_2$ [5]. D'une façon tout à fait qualitative, on peut dire que pour des atomes plus lourds avec une polarisabilité plus grande (In par rapport au Ga ou Se par rapport au S), les bandes de valence/conduction s'élargissent, et la valeur de la bande interdite de la chalcopyrite diminue.

La figure I.5 représente la valeur de la bande interdite en fonction de la valeur du paramètre de maille a, pour différentes chalcopyrites.

Ce diagramme montre que la largeur de la bande interdite varie entre 1 et 1.68 eV pour les deux composés $CuInSe_2$ et $CuGaSe_2$ respectivement en variant la composition en Ga dans l'alliage $Cu(In_{1-x}, Ga_x)Se_2$.

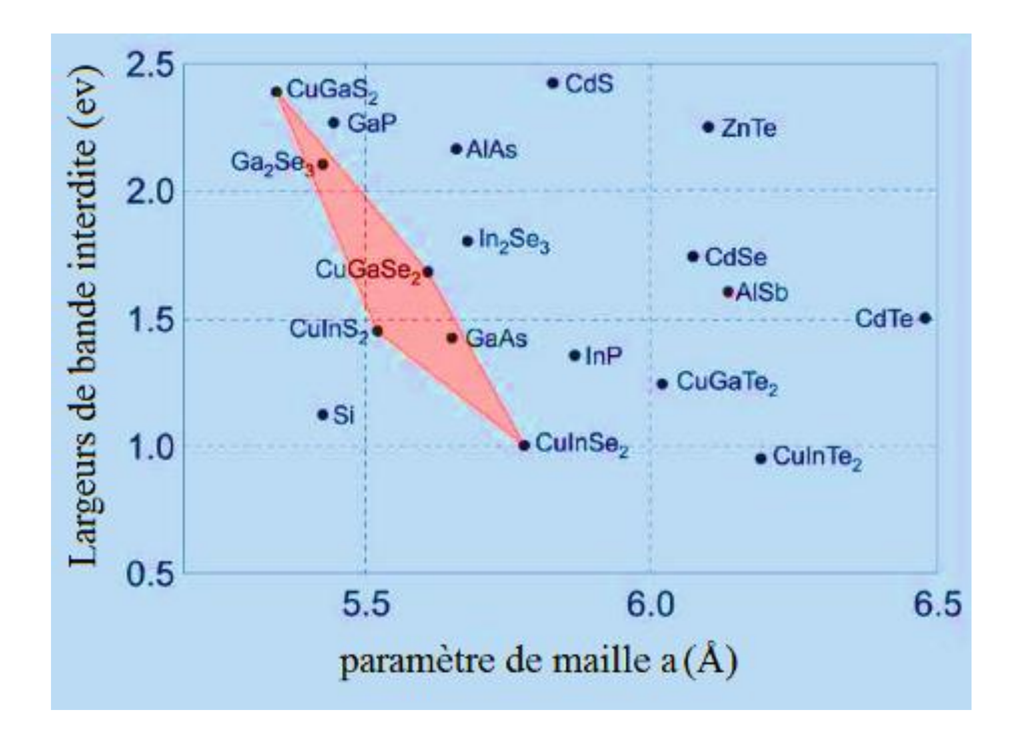


Fig.I.5 : Largeurs de bande interdite et paramètre de maille *a* de certaines chalcopyrites d'après [5].

I.5.2 Ajustement de la bande d'énergie interdite

Comme indiqué précédemment, le CIGS est un alliage entre le CIS et le CGS. La représentation de CIGS est :

$$Cu(In_{1-x}, Ga_x)Se_2 \quad \text{I. 7}$$

Où x représente la fraction molaire de Ga qui est présente dans l'alliage et donnée par :

$$x = \frac{Ga}{(In + Ga)} \quad \text{I. 8}$$

Une valeur x=0 représente le CIS pur avec une bande interdite de 1,07 eV. Une valeur x=1 représente le CGS pur avec une bande interdite de 1,76 eV [6]. Pour x variant de zéro à un, le fabriquant peut ajuster la bande interdite du CIGS à la valeur désirée. L'ajustement de la bande interdite selon le contenu de Ga ne suit pas une loi linéaire. L'équation reliant de bande interdite à la proportion *x* de gallium pour les CIGS intrinsèques à 300 K est comme suit [7] :

$$E_g = 1.011 + 0.664x - 0.249x(1 - x) \quad \text{I. 9}$$

A partir de **(**Equ.I.9**)**, la relation entre *x* et la bande interdite est légèrement parabolique.

L'énergie de la bande interdite est liée à la longueur d'onde du photon par [6] :

$$E_g(eV) = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} \quad \text{I. 10}$$

Où E_g est l'énergie de la bande interdite en électrons volts et λ est la longueur d'onde de la lumière en micromètres. D'après (Equ.I.10), la bande interdite est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Pour le matériau à large bande interdite, il ne peut absorber efficacement que la lumière de longueurs d'onde courtes.

I.5.3 Propriétés optiques

Le coefficient d'absorption de $CuInSe_2$ est très élevé et de l'ordre de 10^5 cm^{-1} [8] dans le domaine du visible et du proche infrarouge (Fig.I.6).

L'équation de conversion des longueurs d'ondes du spectre solaire en énergie est la suivante :

$$E = \frac{hc}{1.6 \times 10^{-19} \times \lambda} \quad \text{I. 11}$$

Avec :

E : l'énergie d'irradiation en eV.

h : la constante de Planck, elle est égale à 6.62 $\times 10^{-34}$ J.s.

c : la vitesse de la lumière dans le vide, elle est égale à 3×10^{8} m s^{-1}.

λ : la longueur d'onde incident en m.

La valeur de l'énergie du gap du $CuInSe_2$ permet d'absorber les photons ayant des longueurs d'onde inférieures à 1192 nm, ce qui indique que la gamme d'absorption de ce ternaire sont située dans la région optimale du spectre solaire.

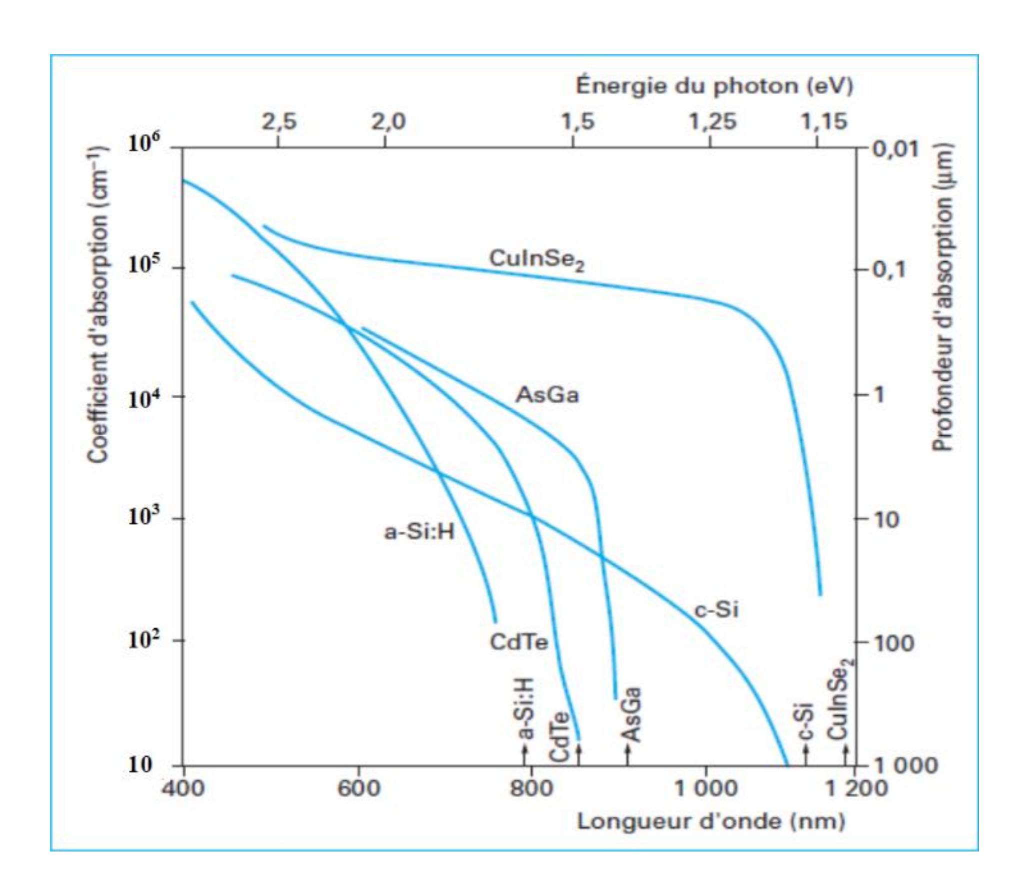


Fig.I.6 : Coefficient d'absorption des différents matériaux [9].

Rappelons que le $CuInSe_2$ est un semiconducteur à gap direct, la relation entre son gap d'énergie E_g et son coefficient d'absorption α est la suivante [10] :

$$\alpha = \frac{A(E - E_g)^{\frac{1}{2}}}{E} \qquad \textbf{I. 12}$$

Avec *A*, une constante de proportionnalité qui dépend des densités des états liés à l'absorption de photon, *E* l'énergie d'irradiation.

La figure I.7 représente le coefficient d'absorption d'une couche mince en $CuInGaSe_2$ avec $x \equiv Ga/(In + Ga) = 0$ et 0.3 en fonction de longueur d'onde.

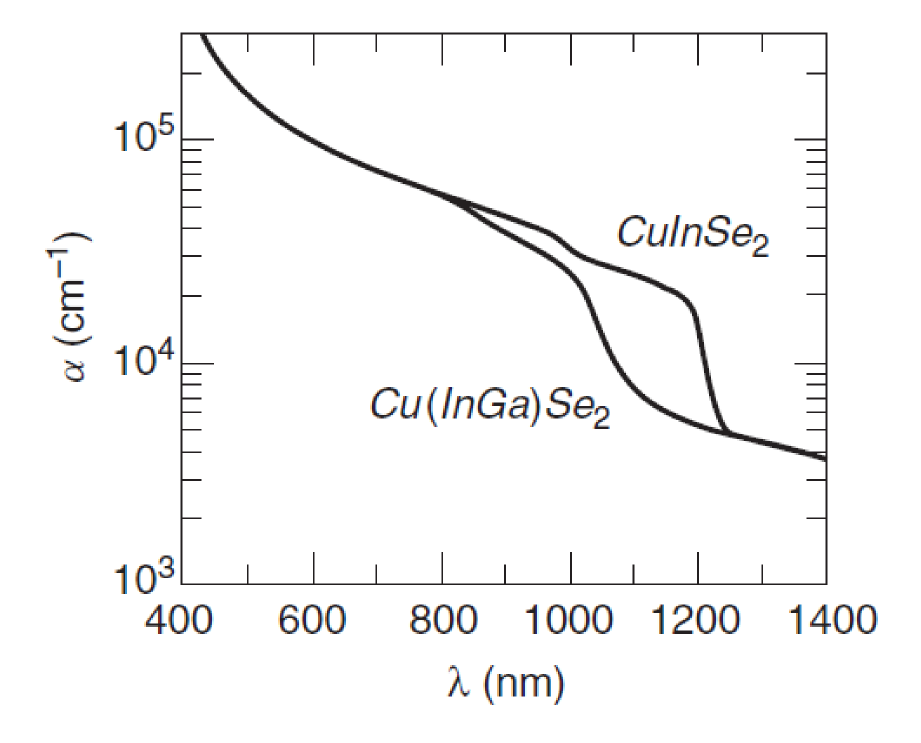


Fig.I.7 : Coefficient d'absorption de $CuInSe_2$ et $CuInGaSe_2$ en fonction de longueur d'onde [10].

Le gap d'énergie de ces semiconducteurs est également une fonction de la température (Fig.I.8), il peut être décrit approximativement par la relation proposée par Varshni [11] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \left(\frac{\alpha T^2}{T + \beta}\right) \qquad \textbf{I.13}$$

Où *Eg* (0) est le gap à 0 K, α et β sont des constantes spécifiques à chaque semi-conducteur. Dans le cas du $CuInSe_2$, ils sont respectivement égaux à 3.6×10^4 eV. K^{-1} et 350 K [12].

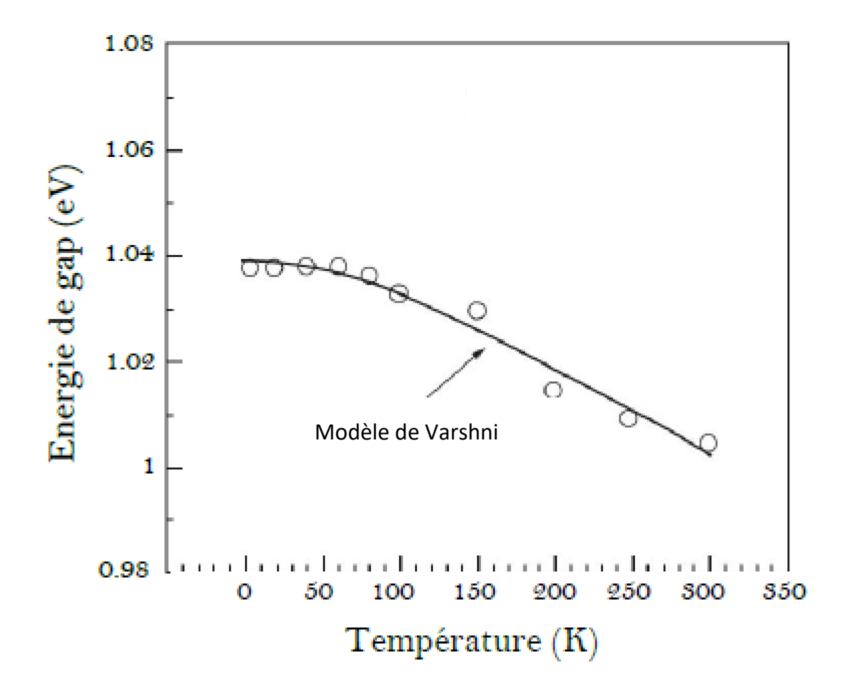


Fig.I.8 : Variation de l'énergie du gap de $CuInSe_2$ en fonction de la température [12].

Notons aussi la relation suivante entre le coefficient d'extinction et l'indice de refraction :

$$N = n + ik \qquad \textbf{I. 14}$$

Où N représente l'indice optique complexe, k est le coefficient d'extinction du matériau traduisant l'absorption du rayonnement par le matériau et n est l'indice de réfraction. C'est le rapport entre la vitesse de propagation de la lumière dans le vide et la vitesse dans le milieu étudié.

Le coefficient d'extinction k est lie au coefficient d'absorption α, pour chaque longueur d'onde λ, par la relation :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \qquad \textbf{I. 15}$$

La figure I.9 représente l'évolution de l'indice de réfraction *n* et le coefficient d'extinction *k* du CIGS en fonction de la longueur d'onde.

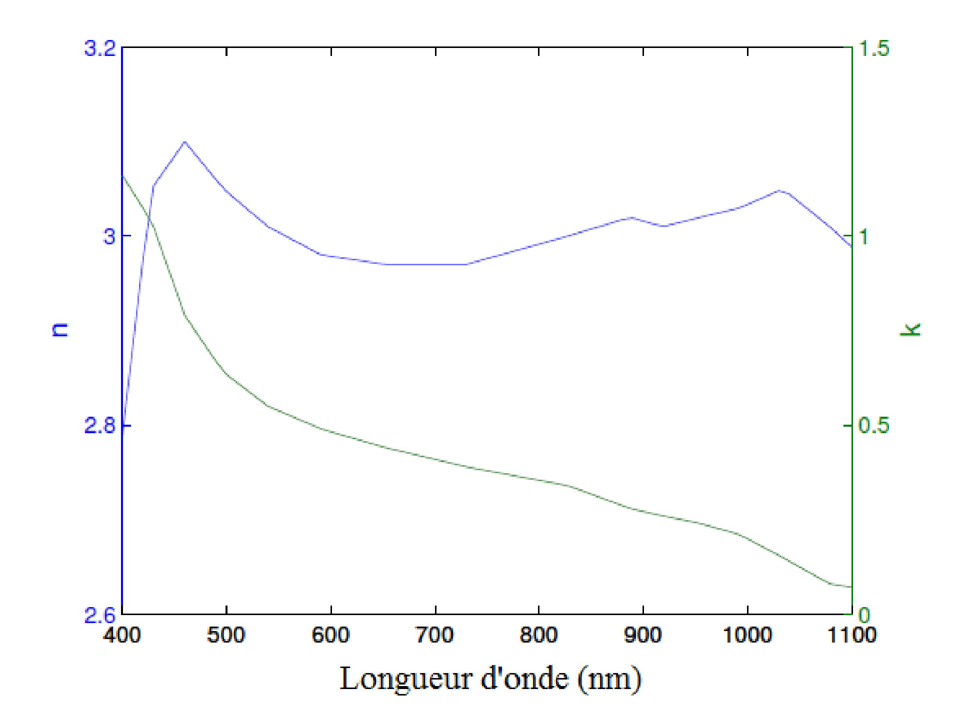


Fig.I.9 : L'évolution de l'indice de réfraction *n* et le coefficient d'extinction *k* du CIGS en fonction de la longueur d'onde [13].

I.6 Les techniques d'élaboration du matériau CIGS

Les techniques actuelles de préparation de CIGS se divisent en trois grandes catégories : la coévaporation, le procédé de sélénisation/sulfuration de précurseur métallique et les procédés de fabrication atmosphérique. Le contact arrière (c'est-à-dire la couche de molybdène) est déposé par pulvérisation cathodique. La sélénisation (l'électrodéposition ou la pulvérisation suivie d'une exposition à un gaz contenant du sélénium), la coévaporation ou la pulvérisation réactive sont ensuite utilisées pour déposer la couche absorbante. La strate tampon naturellement dopée n est adjointe via un bain chimique. Enfin, la couche fenêtre (conducteur supérieur transparent) est toujours déposée par pulvérisation. La meilleure cellule CIGS a été fabriquée par coévaporation [14].

I.6.1 Evaporation à partir des sources élémentaires

La coévaporation est une méthode de dépôt physique par phase vapeur (ou PVD : Physical Vapor Deposition). Les matériaux purs à déposer sont placés sous forme solide dans des creusets portés à haute température. La température des creusets conditionne les flux de vapeur de chaque élément et donc la composition du dépôt. Un vide est nécessaire pour permettre aux flux de vapeur d'atteindre le substrat et pour éviter les impuretés. Le substrat est porté à une température permettant la diffusion des éléments et le contrôle de la croissance cristalline du matériau au fur et à mesure de l'arrivée des vapeurs réactives [15]. Un schéma de principe de cette technique est présenté dans la Figure I.10 suivante :

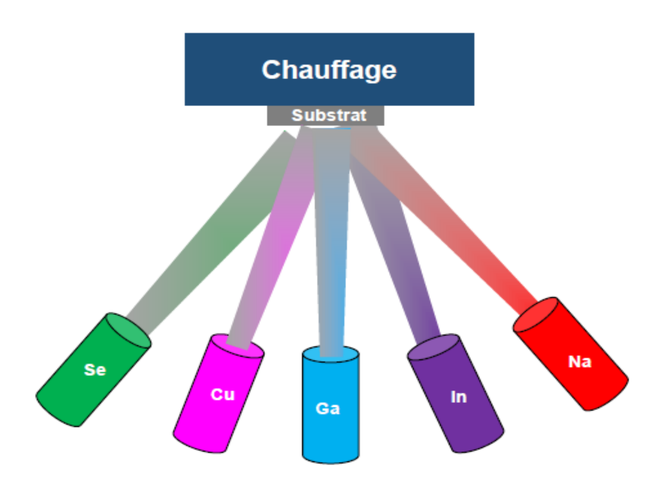


Fig.I.10 : Principe de la technique de la coévaporation thermique pour la couche CIGS [14].

Cette méthode conduit à une marge de manœuvre aisée sur le rapport de Ga/(Ga+In). Ce dernier permet d'obtenir un diagramme de bande mieux adapté au spectre de rayonnement incident. Très récemment, grâce à cette technique, des rendements élevés ont été réalisés par ZSW (20.8%) et NREL (20.3%) [16]. Le procédé de coévaporation à partir de sources élémentaires, optimisé pour obtenir des cellules de haut rendement, se compose typiquement de trois étapes [17], présentées dans la figure I.11.

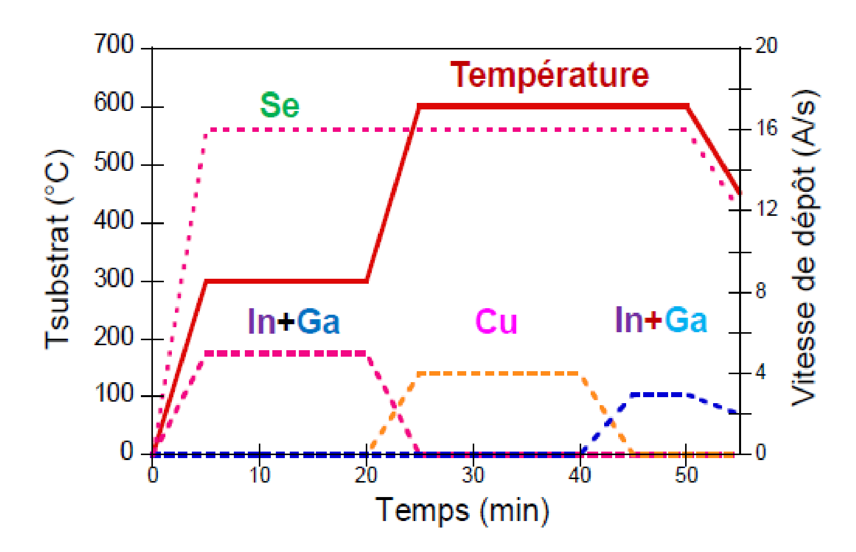


Fig.I.11 : Flux de métaux et profil de température de substrat utilisés dans un procédé en trois étapes de synthèse du CIGS par coévaporation [18].

Une première étape implique le dépôt de $(In,Ga)_2Se_3$ sur un substrat à 300-350°C. Une deuxième étape de dépôt de Cu et Se permet d'obtenir une couche riche en cuivre et d'initier la croissance de gros grains, alors que le procédé se termine par un dépôt riche en indium et gallium pour assurer les bonnes propriétés électroniques de la couche. Les dernières étapes sont effectuées avec une température de substrat de 550 à 600°C. Le refroidissement se fait sous vapeur de Se [19]. L'avantage de cette technique est de pouvoir ajuster facilement la composition, et d'obtenir des films de haute cristallinité avec peu d'impuretés. Mais le changement d'échelle pour obtenir de grands panneaux reste difficile, et la technique est coûteuse en énergie à cause du vide poussé (de l'ordre de 10^{-8} mbar). De plus, elle ne permet qu'une utilisation partielle des matériaux utilisés dans les creusets d'évaporation puisque le matériau se dépose aussi sur les parois de l'évaporateur [15].

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités de base sur la physique des semi-conducteurs et quelques propriétés du matériau CIGS utilisé dans la conception de la cellule solaire à étudier dans ce travail. Ces propriétés concernent les propriétés structurales, électroniques, électriques et optiques. Nous avons aussi décrit le procédé d'élaboration du CIGS.

Références du chapitre I

[1] P. Chawla, S. Singh, S.N. Sharma, « An insight into the mechanism of charge-transfer of hybrid polymer:ternary/quaternary chalcopyrite colloidalnanocrystals », Beilstein J. Nanotechnol. 2014, p 1237

[2] Stuart R. Thomas, Chia-Wei Chen, Manisha Date, Yi-Chung Wang, Hung-Wei Tsai, Zhiming M. Wang, Yu-Lun Chueh, "Recent developments in the synthesis of nanostructured chalcopyrite materials and their applications: A Review", RSC Advances, 2016.

[3] Zeaiter, K., Y. Llinares, and C. Llinares, Structural and photoluminescence study of the quaternary alloys system CuIn(SxSe1-x)2. Solar Energy Materials and Solar Cells,2000. 61(3): p. 313-329.

[4] Yamamoto, N. and T. Miyauchi, Growth of Single-Crystals of CuGaS2 and CuGa1-xInxS2 in in Solution. Japanese Journal of Applied Physics, 1972. 11(9): p. 1383-&.

[5] Jaffe, J.E. and A. Zunger, Theory of the Band-Gap Anomaly in ABC2 Chalcopyrite Semiconductors. Physical Review B, 1984. 29(4): p. 1882-1906.

[6] Douglas A. Columbus, "modeling and simulation of a dual-junction cigs solar cell using silvaco atlas", Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 2014.p26

[7] K. Fotis, « Modeling and simulation of a dual-junction cigs solar cell using silvaco atlas», Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, 2012, p 40

[8] Assia Bouraiou, "Elaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe2 par Électrodéposition", thèse de doctorat, université de Constantine, 2009, p34.

[9] Mansour Hayette, « Simulation numérique d'une cellule solaire à hétérojonction HIT en silicium par le logiciel TCAD-SILVACO », theme de master, Université Mohamed Khider Biskra,2013,p34

[10] Antonio Luque, Steven Hegedus, "Handbook of photovoltaic science and engineering", Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2011, p552-553

[11] Y.P. Varshni, "Temperature dependence of the energy gap in semiconductors", J. Physica, Vol 34, 1967, p149.

[12] K. Yoshino, T. Shimizu, A. Fukuyama, K. Maeda, P.J. Fons, A. Yamada, S. Niki, T.Ikari, " Temperature dependence of photoacoustic spectra in CuInSe2 thin films grown by molecular beam epitaxy", J.Solar Energy Materials and Solar Cells, vol 50, 1998, p131.

[13] Man Xu, Arthur J. H. Wachters, Joop van Deelen, Maurice C. D. Mourad, Pascal J. P. Buskens1, "A study on the optics of copper indium gallium (di)selenide (CIGS) solar cells with ultra-thin absorber layers", Optical Society of America, 2014.

[14] Yan XU, « Fabrication et caractérisation des films CuInGaSe2 par pulvérisation cathodique Etude des défauts par la spectroscopie des pièges profonds par la charge », Thèse De Doctorat, Université De Nantes ,2014, p35

[15] Haddad Yassine, « Elaboration et Caractérisation de Couches Minces de Cu(In,Ga)Se2 », thème de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF 1, 2014,p 18

[16] M.A. Green, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21 (2013) 827–837. Solar cell efficiency tables (version 42).

[17] Noufi, R., J.R. Tuttle, A.L. Tennant, M. Contreras, D.S. Albin, and J.J. Carapella, "Method of fabricating high efficiency $Cu(In,Ga)(Se,S)_2$ thin films for solar cells", Midwest Research Institute (Kansas City, MO): United States, 1995

[18] E. Romero, E.C. Calderon, P.B. Perez, G. Gordillo, Brazilian *Journal of Physics*, 36 (2006) 1050-1053. Phase identification and AES depth profile analysis of Cu(In,Ga)Se2 thin films.

[19] Lydie Ribeaucourt, « Electrodépôt et sélénisation d'alliages Cu-In-Ga en vue de la synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se2 pour cellules solaires », Thèse De Doctorat, Université Pierre Et Marie Curie,2011, p27.

Chapitre II
La Cellule Solaire En CIGS

II.1 Introduction

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique au moyen d'une cellule solaire, l'effet photovoltaïque a été utilisé au début des années cinquante dans les applications pour l'espace (alimentation des satellites) et ses premières utilisations au niveau de la terre est dans les années soixante-dix.

L'élément de base dans la conversion du rayonnement de la lumière est la cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont associées dans un module. Un ensemble de modules sont groupés en panneaux eux même associés pour former le champ photovoltaïque.

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient.

Dans ce chapitre, nous débuterons par donner les caractéristiques du rayonnement solaire et la description de la conversion photovoltaïque tout en étudiant les phénomènes physiques ayant lieu tels la génération des photoporteurs et leur recombinaison dans un semiconducteur.

Ensuite, nous décrivons le principe de fonctionnement et les caractéristiques des cellules solaires en général et les cellules solaires en CIGS en particulier.

II.2 Rayonnement solaire

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 3×10^8 m/s, les rayons du soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir [1].

Le rayonnement reçu par la terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m² avant d'aborder la couche atmosphérique [1].

Pour tenir compte de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire incident (Figure II.1), on introduit un coefficient appelé nombre de masse (AM) défini par :

$$AM = \frac{1}{cos(\theta)} \qquad \textbf{II.1}$$

Où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par définition, AM1 correspond aux Conditions hors atmosphère.

Quand le soleil fait un angle de 48° par rapport au zénith, la lumière incidente est dite AM1.5.

Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (83.3 mW/cm² pour AM1.5) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques.

Les conditions standard de caractérisation sont définies par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnical Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5G global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100 mW/cm² et pour une température de cellule de 25°C [1].

Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et une composant diffusée (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global.

La figure II.1 montre le spectre d'émission solaire sous AM 1.5G global normalisé à 100 mW/cm² [1].

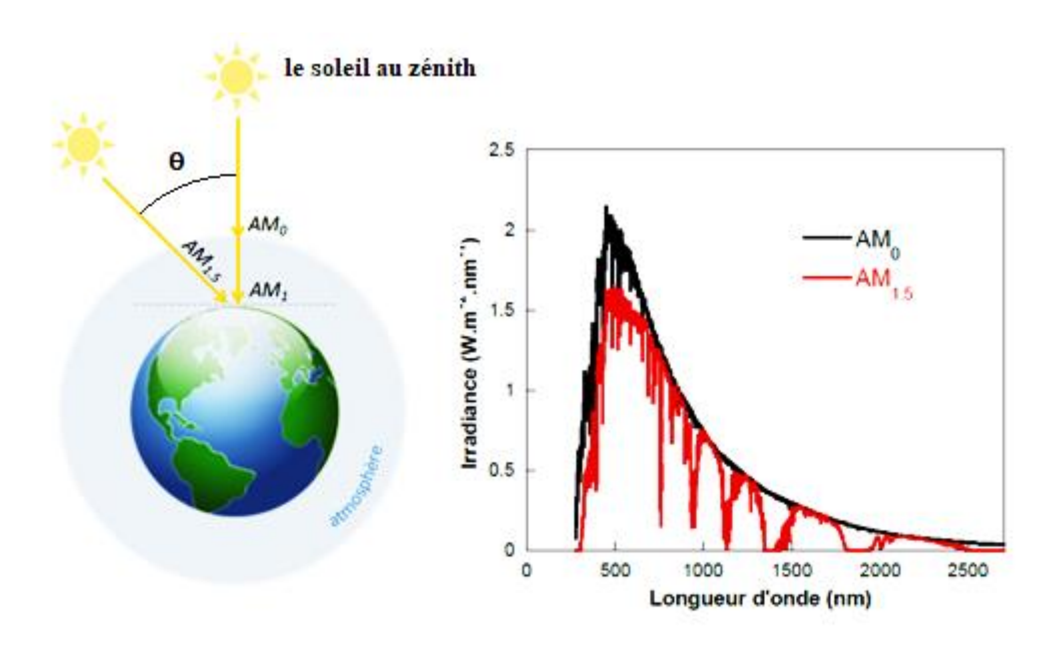


Fig.II.1 : Radiation spectral pour différent air masses.

Le spectre solaire c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent

ce rayonnement électromagnétique, elles sont porteuses d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \qquad \mathbf{II.2}$$

Où ν : fréquence de la radiation, λ : longueur d'onde de la radiation en µm, *c* : vitesse de la lumière, E : énergie du photon en eV, et *h* : constante de Planck.

La figure II.2 représente le spectre solaire et la réponse spectrale des matériaux en CIGS.

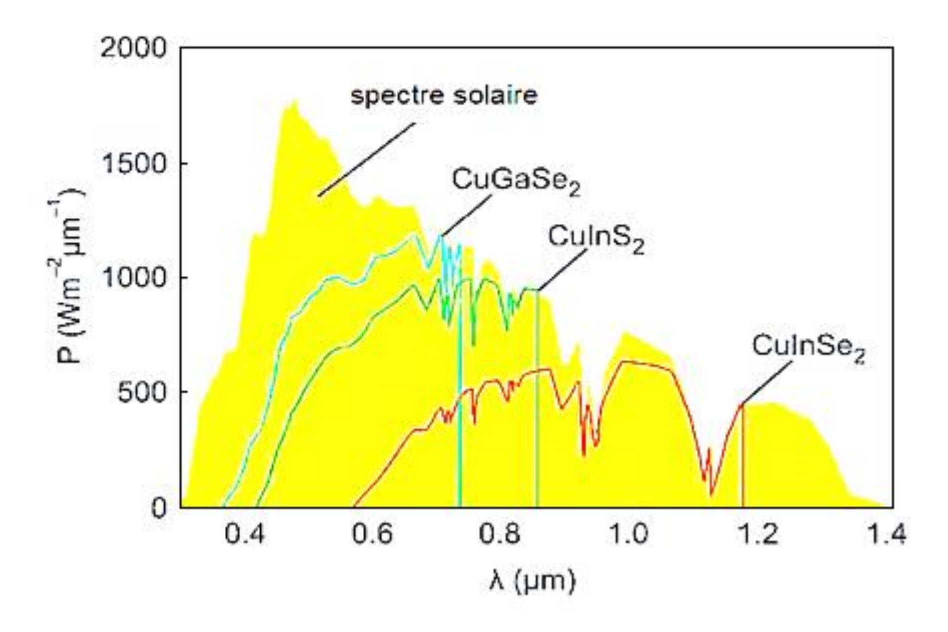


Fig.II.2 : Spectre solaire et la réponse des matériaux CIGS [2].

II.3 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. L'énergie produite par une centrale solaire photovoltaïque est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Cette énergie n'est cependant pas totalement renouvelable, car la fabrication des panneaux photovoltaïques, leur installation et leur exploitation consomment de l'énergie issue en grande partie de sources non renouvelables ; mais un système photovoltaïque produit entre 20 et 40 fois plus d'énergie que ce qui a été utilisé pour le fabriquer [3].

La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques émises par le soleil en électricité. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules regroupés forment une installation solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et le réseau de transport.

En novembre 2015 a été lancée l'alliance internationale pour l'énergie solaire (ou ISA pour « *International solar alliance* »), projet porté par Narendra Modi, visant à réunir les états riches en ressources solaires pour coordonner les politiques de développement du solaire thermique et photovoltaïque (formation, développement de standards communs, partage d'expériences, coentreprises...). La cérémonie de lancement, organisée par l'Inde et la France, a eu lieu à Paris, avec le soutien du secteur privé [3].

En 2016 la consommation mondiale d'électricité s'élève à 23 816 TWh/an, soit l'équivalent de la production d'une surface photovoltaïque de 100 000 km² (équivalent de la superficie de l'Islande) [3].

II.4 Génération de porteurs en excès par la lumière

Une radiation lumineuse rencontrant un semi-conducteur est absorbée suivant la loi de Lambert-Bouguer [4] :

$$I(x) = I(1 - R)\,exp(-\alpha x) = I_0\,exp(-\alpha x) \qquad \textbf{II.3}$$

Où I : le flux de photons ($cm^{-2}s^{-1}$), x : profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semiconducteur, R : coefficient de réflexion, représente la part de l'énergie lumineuse incidente I, réfléchie à la surface du matériau, α : coefficient d'absorption, traduit la probabilité d'absorption d'un photon par unité de longueur.

Quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, des paires électron-trou peuvent se créer. Ce phénomène appelé mode d'absorption intrinsèque ou fondamentale prédomine dans les cellules solaires [4].

Le calcul du taux de génération de paires électron-trou, $G(x)$ ($cm^{-3}s^{-1}$) s'effectue de la façon suivante. Appelant I_0, le flux de photons ($cm^{-2}s^{-1}$) incidents sur la face éclairée du matériau et $\alpha\ (cm^{-1})$ le coefficient d'absorption de la lumière par le matériau. A la profondeur x, ce taux de génération vaut [4] :

$$G(x) = \alpha.(1 - R)I_0 . exp(-\alpha x) \qquad \textbf{II.4}$$

II.5 Mécanismes de recombinaison

Nous avons vu que dans une cellule solaire, des paires électron-trou sont créées par absorption de la lumière. Les recombinaisons de ces paires électron-trou font partie des phénomènes fondamentalement limitants pour la performance des dispositifs photovoltaïques.

Un mécanisme de recombinaison donné est caractérisé par un taux de recombinaison *R*, représentant le nombre de recombinaisons par unité de temps et par unité de volume de matériau semiconducteur. Il existe trois principaux mécanismes : l'effet Auger, la recombinaison radiative et la recombinaison assistée par un piège dans la bande interdite. Cette dernière est aussi appelée recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH). Ce dernier mécanisme est le dominant dans les cellules basées sur des matériaux quaternaires et polycristallins comme le CIGS. La figure II.3 illustre ces différents mécanismes au sein d'un semiconducteur [5,6].

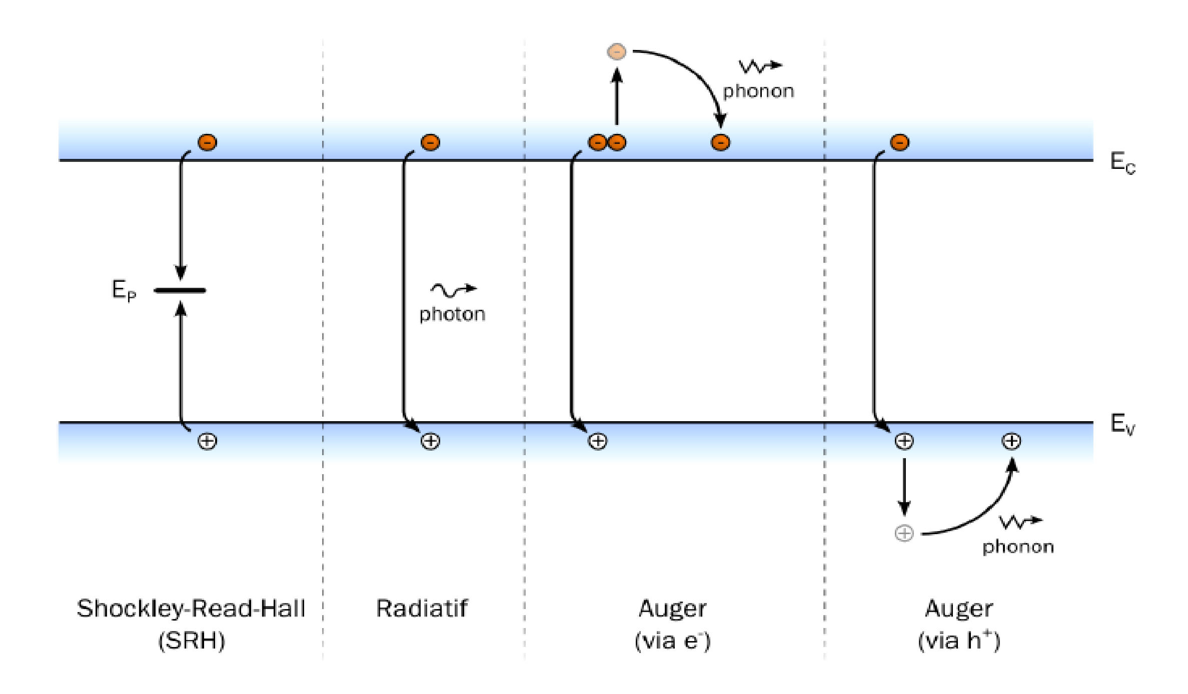


Fig.II.3 : Principaux mécanismes de recombinaison dans un semiconducteur : Shockley-Read-Hall (SRH), radiative et Auger [6,7].

Les recombinaisons SRH se produisent lorsque des niveaux de pièges présents dans la bande interdite où se manifeste la capture des porteurs. Les niveaux susceptibles de participer aux recombinaisons SRH peuvent provenir de défauts structurels ou de la présence d'impuretés dans le CIGS. Le taux de recombinaison par ce mécanisme pour un piège d'énergie E_p vaut [6,7]:

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{SRH,n}\left(p + n_i exp\frac{E_i - E_p}{kT}\right) + \tau_{SRH,p}\left(n + n_i exp\frac{E_p - E_i}{kT}\right)} \quad \textbf{II.5}$$

Avec $\tau_{SRH,n}$ et $\tau_{SRH,p}$ les temps de vie de chaque type de porteurs et E_i le niveau de Fermi dans le semiconducteur intrinsèque. Cependant, il est possible de simplifier cette expression. En effet par définition dans un semiconducteur dopé, les porteurs majoritaires sont en large excès par rapport aux porteurs minoritaires. Puis qu'il est nécessaire de disposer d'un porteur de chaque type pour qu'une recombinaison ait lieu, c'est donc la densité de porteurs minoritaires qui détermine principalement le taux de recombinaison. Ainsi, dans des conditions normales de fonctionnement d'une cellule, pour un semiconducteur de type p comme le CIGS et en considérant que les niveaux de piège sont proches du milieu de la bande interdite $\left(E_p \approx \frac{E_g}{2}\right)$, le taux de recombinaisons SRH peut s'écrire [6-7] :

$$R_{SRH} \approx \frac{n - n_0}{\tau_{SRH,n}} \quad \textbf{II.6}$$

Avec n_0 la densité d'électrons à l'équilibre. Le temps de vie des électrons peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\tau_{SRH,n} = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_p} \quad \textbf{II.7}$$

Avec σ_n la section efficace de capture des électrons par le piège considéré, v_{th} la vitesse thermique des électrons et N_p la densité de pièges d'énergie E_p. Ainsi, le temps de vie des porteurs sera réduit si la densité de pièges augmente. Il est donc évident qu'un matériau présentant plus de défauts structurels ou d'impuretés présentera un taux de recombinaisons SRH grand. Ce mécanisme est dominant dans les cellules basées sur des matériaux quaternaires et poly cristallins comme le CIGS. Les expressions précédentes étant valables pour un piège avec une énergie donnée, le taux total de recombinaisons SRH vaut [6] :

$$R_{SRH} = \sum_{i} R_{SRH,i} \qquad \text{II.8}$$

Chaque *i* étant un piège avec un niveau d'énergie $E_{p,i}$ dans la bande interdite.

Les recombinaisons radiatives se font par transition directe d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence. L'énergie de la transition est libérée sous forme d'un photon. Dans le CIGS de type p, en tenant compte des mêmes simplifications que pour les recombinaisons SRH, le taux de recombinaisons radiatives s'écrit [6] :

$$R_{rad} \approx \frac{n - n_0}{\tau_{Rad,n}} \qquad \text{II.9}$$

Le temps de vie des électrons $\tau_{Rad,n}$ vis-à-vis des recombinaisons radiatives vaut[6] :

$$\tau_{Rad,n} = \frac{1}{p_0 B} \qquad \text{II.10}$$

Avec B le coefficient de recombinaison radiative et p_0 la densité de trous à l'équilibre thermodynamique.

On remarque donc que pour les recombinaisons radiatives, le temps de vie des porteurs diminuera quand le dopage p du CIGS augmente. Le photon émis lors d'une recombinaison de ce type possède une énergie proche du gap du matériau. Il est donc possible que celui-ci soit réabsorbé et reforme ainsi une paire électron-trou. Cette récupération n'est pas possible dans le cas d'une recombinaison SRH [6].

Les recombinaisons Auger sont elles aussi des transferts directs bande à bande d'un porteur. Dans ce cas il peut s'agir d'un électron ou d'un trou. Cependant, au lieu d'être émise sous forme d'un photon, l'énergie est transférée à un autre porteur du même type. Ce dernier se thématisera ensuite par émission de phonons [6] (voir figure II.3).

Pour le CIGS, dans le cas simplifié, le taux de recombinaisons Auger s'écrit [6] :

$$R_{Auger} \approx \frac{n - n_0}{\tau_{Auger,n}} \qquad \text{II.11}$$

Le temps de vie des électrons $\tau_{Auger,n}$ vis-à-vis des recombinaisons Auger vaut [6]:

$$\tau_{Auger,n} \approx \frac{1}{p_0^2 C_p} \qquad \text{II.12}$$

Où C_p est le coefficient de recombinaison Auger. On voit ici que le temps de vie des porteurs diminue suivant le carré de la densité de trous et donc du dopage. Cela montre que les bénéfices d'un dopage plus élevé sont limités par les recombinaisons Auger.

Des niveaux d'énergie d'états spécifiques (états de surface), provenant de phénomènes intrinsèques (des liaisons non satisfaites des atomes de surface, disparition de la périodicité du réseau, adsorption d'atomes étrangers), peuvent se situer dans la bande interdite. Certains de ces états jouent également le rôle de centres de recombinaison. La surface d'un semiconducteur est un lieu où les recombinaisons sont nombreuses. Le taux de recombinaison Shockley-Read-Hall en surface est donné par l'expression suivante [8] :

$$U_s = \frac{n_s p_s - n_i^2}{\frac{(n_s + n_1)}{S_p} + \frac{(p_s + p_1)}{S_n}} \qquad \textbf{II.13}$$

Où S_p et S_n (cm/s) sont respectivement les vitesses de recombinaison en surface pour les électrons et les trous, n_s et p_s sont les concentrations des porteurs à la surface. n_1 et p_1 représentent les termes d'émission et sont donnés par [8]:

$$n_1 = n_i exp\frac{E_t - E_{f_i}}{KT} \text{ , } p_1 = n_i exp\frac{-(E_t - E_{f_i})}{KT} \qquad \textbf{II.14}$$

Tels que E_t représente l'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite, E_{f_i} le niveau de Fermi intrinsèque et n_i la concentration intrinsèque.

Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, il est important de décrire les phénomènes qui régissent l'interaction entre un semi-conducteur et le rayonnement lumineux.

II.6 Interaction rayonnement/semi-conducteur

Les trois processus qui peuvent se produire lors de l'interaction rayonnement/semi-conducteur sont [9] :

- L'absorption fondamentale qui représente le passage d'un électron d'un état occupé de la bande de valence à un état vide de la bande de conduction après l'absorption d'un photon,
- L'émission spontanée qui représente le passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence avec émission d'un photon,

- L'émission stimulée qui représente le passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence suite à l'absorption d'un photon avec l'émission d'un deuxième photon.

Ces différents processus sont fonction du type de semi-conducteur. Nous devons distinguer les semi-conducteurs à bande interdite directe et ceux à bande interdite indirecte (Fig.II.4).

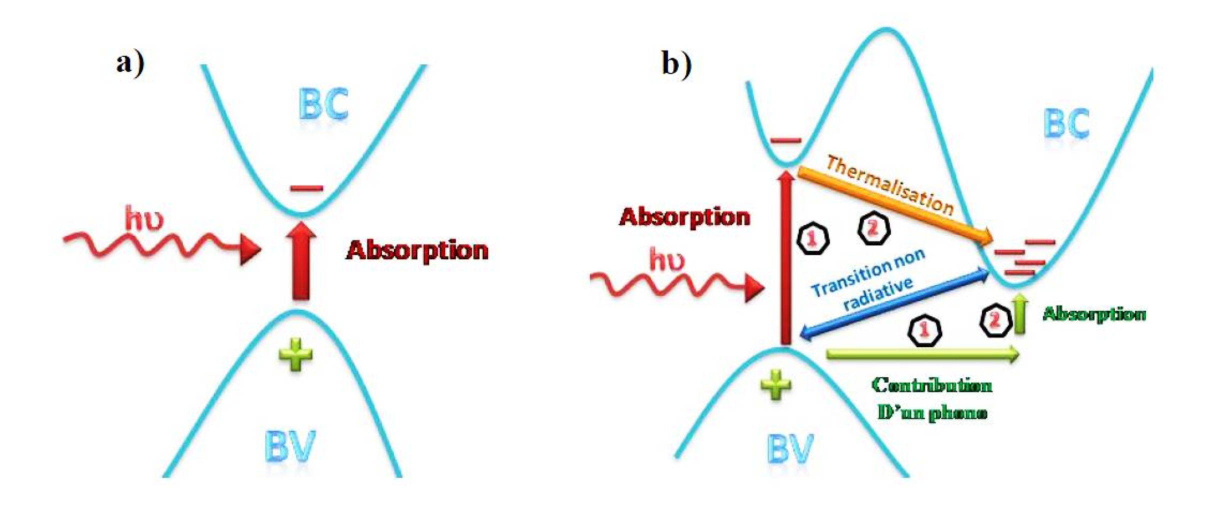


Fig.II.4 : Transitions bande à bande dans un semiconducteur (a) à bande interdite directe et (b) à bande interdite indirecte [10].

Un semi-conducteur est à bande interdite directe quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont verticales (voir figure II.4(a)). Les transitions bande à bande (de la bande de conduction vers la bande de valence) sont radiatives (émission spontanée) et sont favorisées avec ce type de semi-conducteur utilisé en optoélectronique (matériau III-V en général comme le GaAs) [9].

Un semi-conducteur est à bande interdite indirecte quand le minimum de la bande de conduction est décalé par rapport au maximum de la bande de valence.

Les transitions bande à bande sont non-radiatives (voir figure II.4(b)). Ceci est le cas même si avec un photon de plus grande énergie, un électron peut être directement excité vers un minimum relatif de la bande de conduction et se thermalisme dans le minimum absolu de la bande de conduction. La transition d'un électron dans un matériau à bande interdite indirecte est assistée par un phonon absorbé ou émis par l'électron afin que son vecteur d'onde corresponde au maximum de la bande de valence pour absorber un photon [9].

II.7 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de toute cellule photovoltaïque est basé sur l'existence d'un champ interne afin de séparer les paires électron- trou générées par l'absorption de la lumière.

Cette barrière de potentiel peut être créée par [9] :

- Une jonction p-n avec un même semi-conducteur que l'on appelle *homojonction*
- Une jonction p-n avec deux semi-conducteurs différents que l'on appelle *hétérojonction*
- Un contact métal/semi-conducteur de type Schottky.

Le principe de fonctionnement d'une cellule à jonction p-n à homojonction est décrit dans la figure II.5.

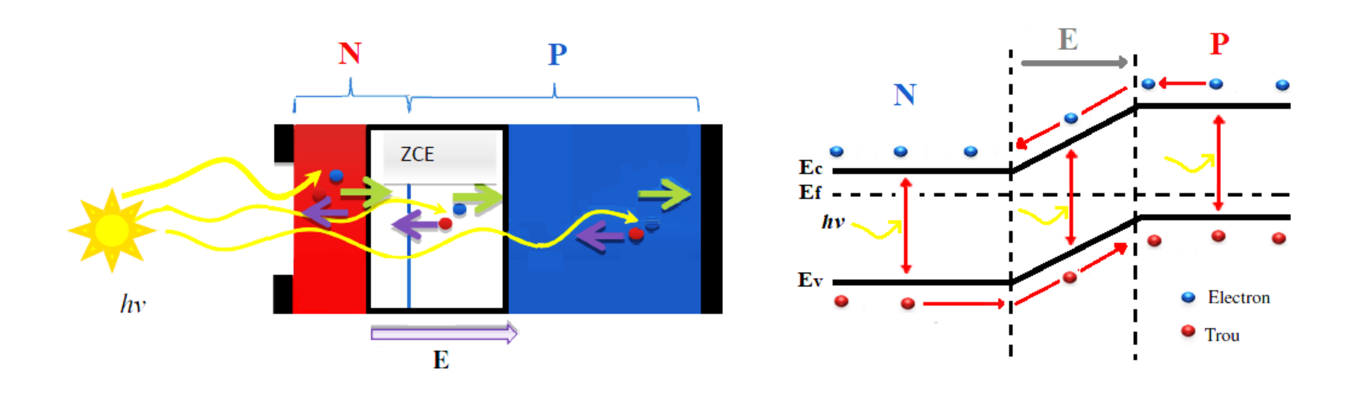


Fig.II.5 : Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire.

Les photons incidents créent des paires électron-trou dans les régions N et P et dans la zone de charge d'espace [9-11] :

- Si une paire est générée dans une zone électriquement neutre (P ou N), les porteurs diffusent. Si les porteurs minoritaires atteignent la zone de charge d'espace alors ils sont propulsés par le champ électrique dans la zone où ils deviennent porteurs majoritaires. Ces porteurs contribuent ainsi au courant par leur diffusion et il se crée un courant de diffusion.
- Si une paire électron-trou est générée dans la zone de charge d'espace, l'électron et le trou sont séparés par le champ électrique et chacun est propulsé dans la région où il

est porteur majoritaire (région N pour l'électron et région P pour le trou). Ces porteurs donnent naissance à un courant de génération.

Ces deux contributions donnent naissance à un photocourant qui contribue au courant inverse de la diode formée par la jonction. Le courant inverse d'une jonction p-n est fonction des densités de porteurs minoritaires dans les régions neutres de la diode et de la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace. L'éclairement augmente le courant inverse par la création de porteurs minoritaires dans les zones neutres et la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace [9].

II.8 Caractéristique I (V) et schéma équivalent d'une cellule solaire

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et soumise à l'éclairement solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de diode. Sa caractéristique I (V) correspond à la soustraction du photocourant et du courant de la diode à l'obscurité par [12] :

$$I(V) = I_{obs}(V) - I_{ph} = I_s\left(exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1\right) - I_{ph} \qquad \textbf{II.15}$$

Avec I_{ph} le photocourant, I_{obs} le courant d'obscurité, I_s le courant de saturation de la diode, q la charge élémentaire, K la constante de Boltzmann et T la température.

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Nous avons représenté sur la figure II.6 les deux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité en pointillés, et sous illumination en trait plein.

On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur I_{cc}, qui traduit la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la cellule sous lumière à tension nulle. La valeur V_{co}, à l'inverse, est la tension de circuit ouvert. Il représente en fait l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant à l'obscurité [13].

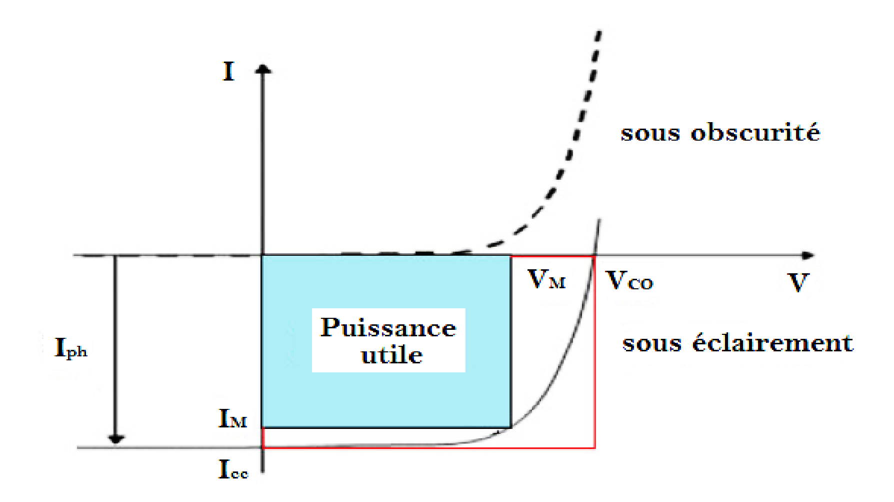


Fig.II.6 : Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.

Son schéma équivalent est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant (figure II.7). La résistance série, R_s, cette résistance est liée à l'impédance des électrodes et de la base, il en résulte que la tension *V* aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction. La résistance shunt, R_{sh}, qui correspond aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge [14].

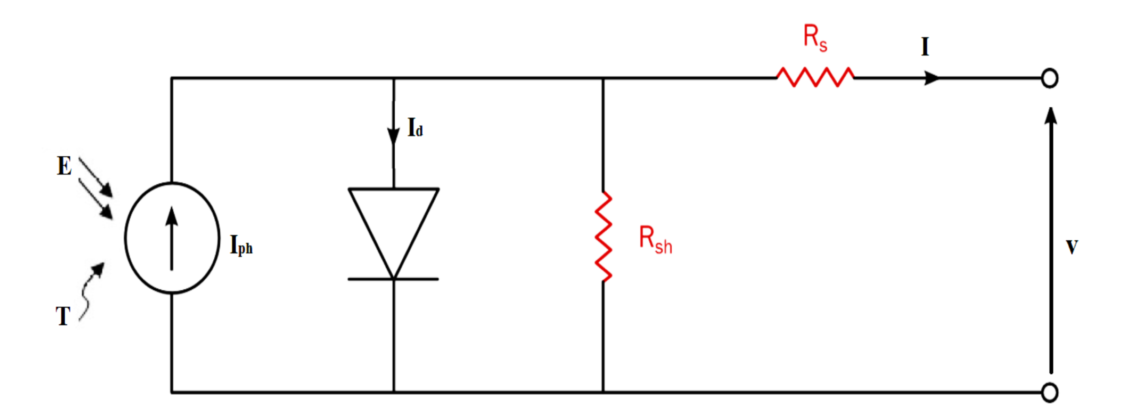


Fig.II.7 : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.

Le courant *I* peut s'écrire :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \qquad \textbf{II. 16}$$

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans la figure II.7, on a :

$$I = I_{ph} - I_d - \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}}\right) \qquad \textbf{II.17}$$

$$I = I_{ph} - I_s\left[exp\left(\frac{V + I.R_s}{A.U_T}\right) - 1\right] - \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}}\right) \qquad \textbf{II.18}$$

Avec A : Facteur de qualité et $U_T = \frac{K.T}{q}$

II.9 Paramètres d'une cellule solaire

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- Le courant de court-circuit I_{cc}
- La tension en circuit ouvert V_{co}
- Le facteur de forme FF
- Le rendement de conversion d'énergie η
- La réponse spectrale RS

II.9.1 Courant de court-circuit, I_{cc}

Le courant de court-circuit est le courant débuté par la cellule sous éclairement en court-circuitant la sortie. C'est à dire que : $I_{cc} = I(V = 0)$.

Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant de photo génération I_{ph} [14].

II.9.2 Tension de circuit ouvert, V_{co}

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire : $V_{co} = V\ (I = 0)$.

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par [14] :

$$V_{co} = U_T ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \qquad \textbf{II.19}$$

II.9.3 Facteur de forme, *FF*

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (P_{max}) pour un point de fonctionnement $P_{max}(I_{max}, V_{max})$ de la courbe courant-tension (Figure II.6). Le facteur de forme est défini par la relation suivante [13] :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co}.I_{cc}} = \frac{V_{max}.I_{max}}{V_{co}.I_{cc}} \quad \textbf{II.20}$$

II.9.4 Rendement de conversion, *η*

Le rendement η, des cellules solaires désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in}[13].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = FF.\frac{V_{co}.I_{cc}}{P_{in}} \quad \textbf{II.21}$$

Où P_{in} est la puissance incidente de la lumière est égale à la puissance solaire $P_{solaire}$ ($P_{solaire} = 100\ mW/cm^2$).

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ($R_c = \infty,\ I = 0,\ V = V_{co}$) ou en court-circuit ($R_c = 0,\ I = I_{cc},\ V = 0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée P_{max} [13] (figure II.8).

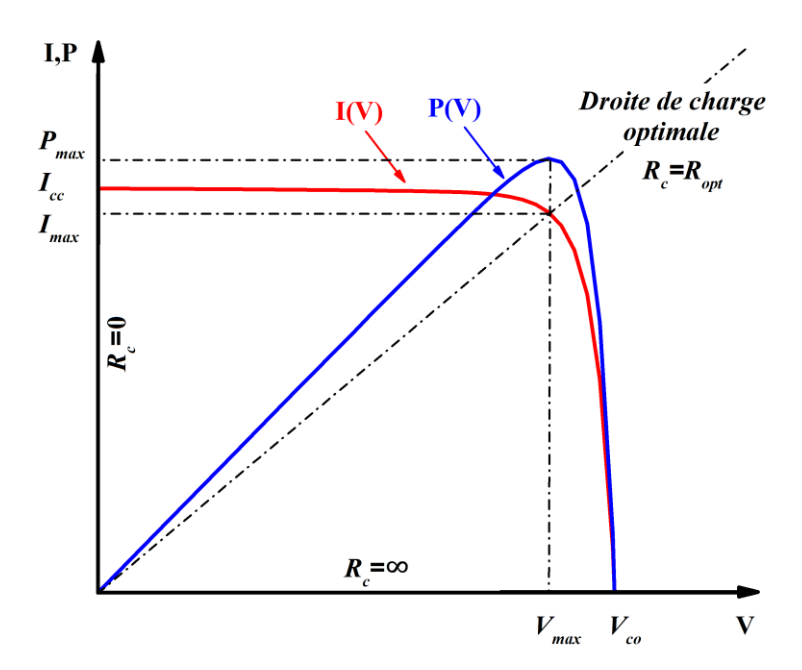


Fig.II.8 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire.

II.9.5 Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque

La réponse spectrale *RS* d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident.

La réponse spectrale *RS* est donnée par la relation suivante [15] :

$$RS(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (A/W) \qquad \textbf{II.22}$$

Le rendement quantique externe *EQE* de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde, il est relié à la réponse spectrale par [15] :

$$EQE(\lambda) = RS(\lambda)\frac{hc}{\lambda q} \qquad \textbf{II.23}$$

Le rendement quantique interne *IQE* de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe *EQE* par l'équation [15] :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \qquad \textbf{II.24}$$

Le coefficient de réflexion s'écrit : $R(\lambda) = \left(\frac{n_2(\lambda)-n_1(\lambda)}{n_2(\lambda)+n_1(\lambda)}\right)^2$ si les matériaux en contact sont d'indices de réfraction n_1 et n_2.

II.10 Cellule solaire en couche-mince

Par principe, une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques "µm" (typiquement ce sont des couches de 10 … 100 nanomètres d'épaisseur).

Dans le domaine des couches minces, il existe trois principales filières :

- La filière silicium amorphe et microcristallin noté TFSi (Thin-Film Silicon).
- La filière CdTe (Tellurure de Cadmium).
- La filière $\mathrm{Cu(In,Ga)Se_2}$ (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) noté CIGS.

II.10.1 Filière silicium en couches minces

Depuis les années 1976, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe, dont les liaisons pendantes sont saturées par hydrogénation (a-Si :H). Ce matériau présente un fort coefficient d'absorption qui autorise de très faibles épaisseurs de l'ordre du micron et une faible consommation énergétique durant le cycle de production et l'aptitude à être déposé en grandes surfaces. Par contre, ses deux points faibles sont le rendement de conversion et la dégradation sous lumière (instabilité dite de Staebler-Wronski).

La figure II.9 présente la plus simple structure d'une cellule en silicium amorphe, elle se compose d'une zone dopée bore, intrinsèque et dopée phosphore (p-i-n).

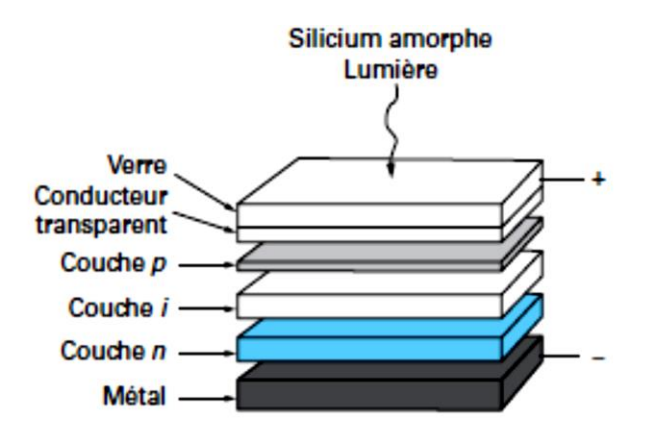


Fig.II.9 : Cellule solaire au silicium amorphe [16].

On peut trouver dans la figure II.10, les caractéristiques électriques réelles et simulées d'une cellule en silicium amorphe développée en laboratoire [17]. Cette cellule montre un rendement record de 8.5% pour une simple jonction amorphe avec un facteur de forme de 0,719. On peut remarquer l'existante d'une différence importante des performances entre les différentes technologies silicium. La cellule amorphe produit 22.5mA/cm² contre 38.1mA/cm² pour une cellule solaire en silicium multi-cristalline avec une tension de circuit-ouvert de 0.524V contre 0.654V de la cellule solaire en silicium multi-cristallin [18].

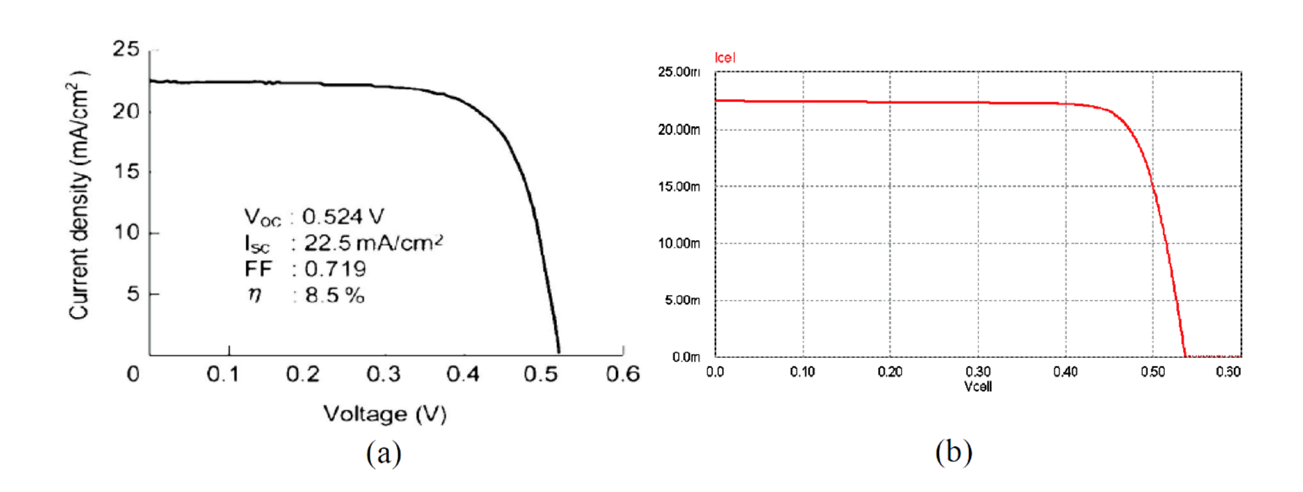


Fig.II.10 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire en silicium amorphe. (a) Courbe réelle, (b) Courbe simulée [18].

II.10.2 Filière tellurure de cadmium (CdTe)

Les cellules solaires au tellurure de cadmium (CdTe) présentent les avantages liés à la technologie en couches minces, elles sont légères et robustes. Le tellurure de cadmium est employé en tant que semi-conducteur dopé p. Un autre matériau est donc requis pour réaliser la jonction p-n, à savoir du sulfure de cadmium dopé n (CdS) (Fig.II.11).

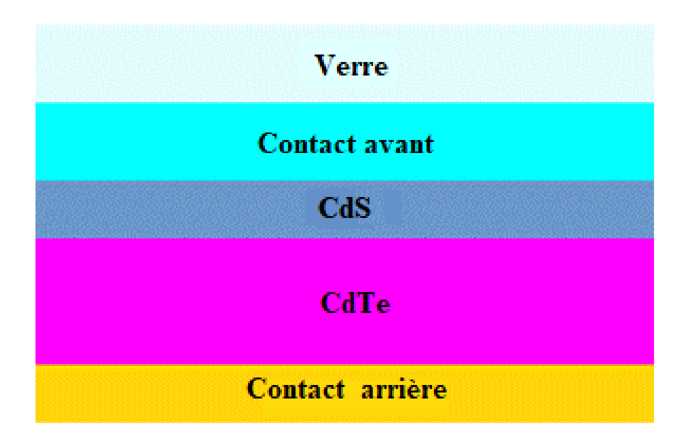


Fig.II.11 : Cellule solaire au tellurure de cadmium.

Malgré des rendements excédant les 21% sur une surface de 1 cm^2. Cependant les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du cadium freinent les tentatives de développement de cette filière [11].

II.10.3 Filière Cu(In,Ga)Se_2

L'émergence des cellules solaires, basées sur les matériaux à structures chalcopyrites, a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques $CuInSe_2$ / CdS par S. Wagner et Coll de Bell Téléphone en 1974-1975. S. Wagner et Coll avaient rapporté la préparation d'hétérojonctions p-n $CuInSe_2$/CdS à partir d'un monocristal $CuInSe_2$, dont la conductivité est de type p, sur lequel une couche mince de CdS de 5-10 µm d'épaisseur avait été déposée. La réponse photovoltaïque de ces détecteurs pour une lumière incidente à travers la fenêtre en CdS donnait lieu à de très hauts rendements quantiques (70%) uniformes entre 0,55 et 1,25 µm. Ces hétérojonctions avaient des rendements solaires de l'ordre de 5%. Les composés ternaires chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement $CuGaSe_2$, $CuInS_2$, $Cu(In, Al)\ Se_2$ et $Cu(In, Ga)Se_2$. Du fait de leurs grands coefficients d'absorption optique, une épaisseur de 1,5-2 µm est suffisante pour absorber la partie utile du spectre solaire [19].

La Figure II.12 représente les caractéristiques I(V) réelle et simulée d'une cellule CIGS réalisée en laboratoire avec un rendement de 17.5% pour un ensoleillement AM1.5.

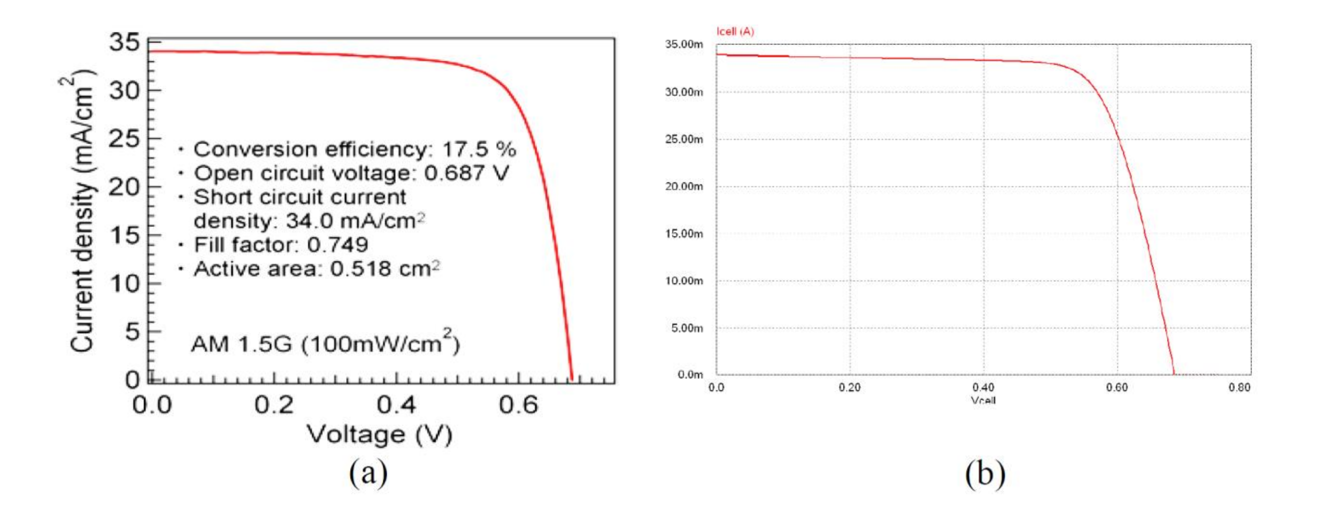


Fig.II.12 : Caractéristique courant-tension d'une cellule CIGS [18].

Bien que la majeure partie de la production de cellules solaires soit faite sur des substrats de verre, on voit apparaître progressivement de nouveaux substrats souples compatibles avec la filière couche mince. Ces nouveaux substrats (métal ou plastique) présentent les avantages d'être plus légers que le verre, plus faciles à mettre en œuvre et surtout moins coûteux. Ces caractéristiques font d'eux des substrats de choix pour le futur [18].

II.10.4 Multi-jonctions en couches minces

Le principe d'une cellule solaire multi-jonction étant d'absorber plus de longueurs d'onde du spectre solaire, naturellement l'idée viendrait d'ajouter des diodes supplémentaires avec des matériaux à gaps décroissants pour augmenter encore plus le rendement [20] (fig.II.13).

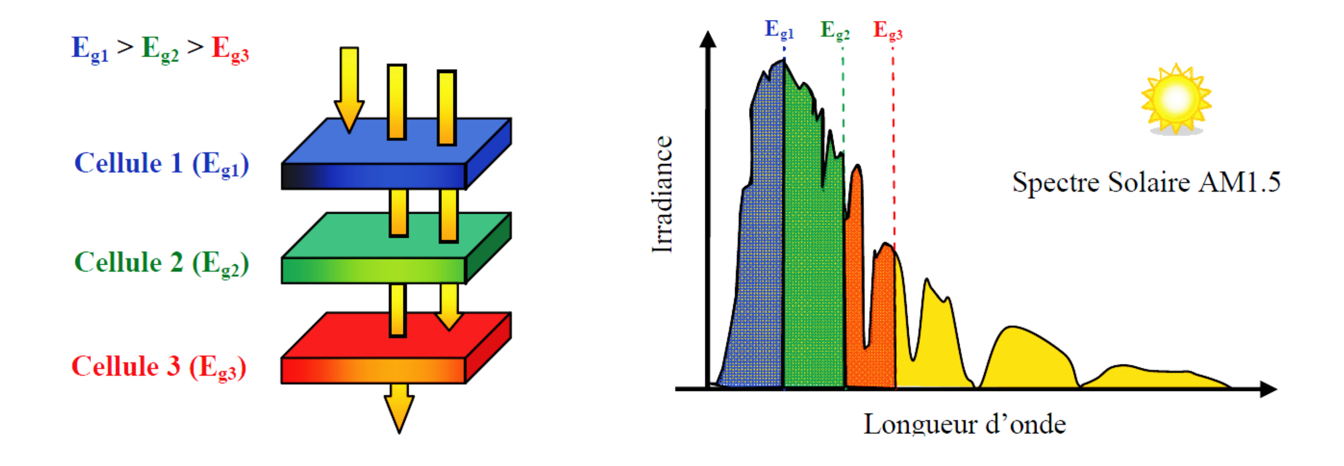


Fig.II.13 : Principe de la cellule solaire multi-jonctions [18].

Pour les cellules multi-jonctions en semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAsP), de très bons rendements sont obtenus avec cette filière mais les coûts de fabrication sont plus élevés (bâti sous ultravide, croissance très lente). Ces cellules sont destinées à des applications spatiales, un rendement de 32 % a été obtenu avec une triple jonction GaInP/GaAs/Ge sans concentrateur et 41 % avec concentrateur [9].

II.11 Cellule solaire en CIGS

Le développement de cellules solaires à base de CIGS a débuté dans les années 1970. Les rendements de conversion des dispositifs dépassent 22% en laboratoire et atteignent 16% à l'échelle industrielle [21]. Bien qu'une cellule CIGS soit constituée d'au moins 6 matériaux différents, c'est principalement la compréhension et l'amélioration des propriétés du matériau absorbeur qui sont au cœur des progrès réalisés. L'utilisation de substrats métalliques à la place du verre constitue une véritable problématique additionnelle.

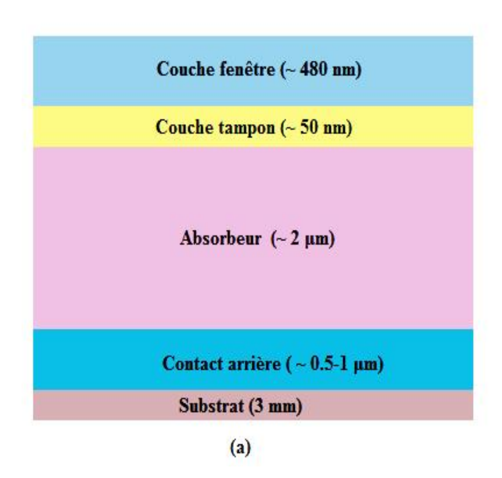
II.12 Structure de la cellule CIGS

Dans sa structure la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. La figure (II.14) présente la structure standard d'une cellule à base de $Cu(In,Ga)Se_2$.

Les principaux éléments dans la cellule sont [5] :

II.12.1 Substrat

Le substrat le plus couramment utilisé est le verre sodo-calcique, qui présente toutes les propriétés requises. Il contient notamment du sodium, qui diffuse vers le CIGS lors de l'étape de recuit. Son effet bénéfique sur le fonctionnement de la cellule a été démontré par de nombreux auteurs [22,23].



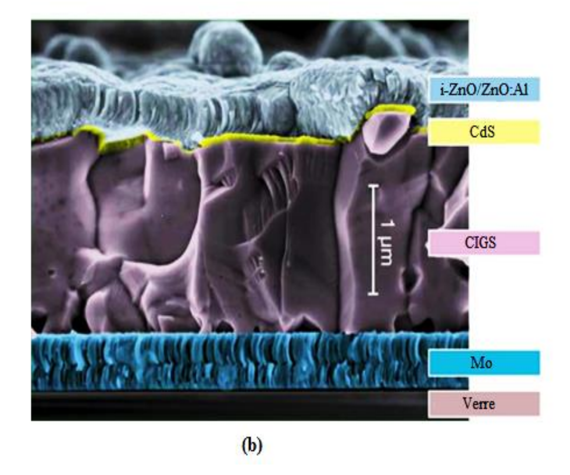


Fig.II.14 : (a) schéma de l'empilement des différentes couches d'une cellule en CIGS, (b) image de la tranche d'une cellule en CIGS obtenue par un microscope électronique à balayage (MEB).

II.12.2 Contact arrière

Le contact arrière, qui constitue l'anode de la cellule solaire, est un métal déposé sur la partie inférieure de l'absorbeur dont le rôle est de collecter les porteurs à partir de l'absorbeur et de les livrer à la charge externe. Il doit donc, répondre à certains critères chimiques, mécaniques et économiques. De nombreux métaux ont été étudiés comme le Tungstène, le Molybdène, le Chrome, le Tantale, le Manganèse [24], l'Or, l'Aluminium, l'Argent et le cuivre [25]. Parmi ces métaux, le Molybdène qui est le plus couramment utilisé comme contact arrière des cellules solaires CIGS par les laboratoires de recherche et en industrie, en raison de sa stabilité relative aux températures élevées rencontrées lors du procédé de fabrication du CIGS (de l'ordre de 550 à 600°C), et de sa faible résistance de contact avec le CIGS. Son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt utilisée est la pulvérisation cathodique. La valeur typique de la résistivité de Mo est de l'ordre 5×10^{-5} Ω.cm ou moins. De plus, il ne réagit pas avec le CIGS ou y diffuse.

En effet, le Mo peut réagir avec le Se lors du dépôt de CIGS pour former une couche de quelques nanomètres du $MoSe_2$. Par conséquent, la structure CIGS/Mo devient alors CIGS/$MoSe_2$/Mo. Le $MoSe_2$ est un semi-conducteur possédant un gap de 1,41 eV [26], il est plus élevé que celui du CIGS est permet ainsi, de diminuer les recombinaisons à l'interface de ces deux couches [27]. De plus, il a pour effet de donner un comportement ohmique à l'hétéro contact CIGS/Mo [26, 28].

II.12.3 Absorbeur en CIGS

L'absorbeur est la partie de la cellule dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous. Dans le cas présent, il s'agit d'un semi-conducteur de type P de la famille I-III-VI, dont les différentes variantes déjà étudiées conduisent à la formule générale suivante : $(Cu, Ag) (In, Ga, Al) (Se, S, Te)_2$. La substitution du Cu par de l'argent, de l'indium par du gallium ou de l'aluminium, du sélénium par du soufre ou du tellure, permet de modifier les propriétés du matériau comme sa largeur de bande interdite. Le composé le plus développé en recherche et en industrie, et qui constitue le sujet de notre étude, est le $Cu(In, Ga)Se_2$ [29].

II.12.4 Couche tampon en CdS

La couche tampon est un semi-conducteur ayant une conductivité de type n dont le gap doit être supérieur à celui de l'absorbeur. Deux rôles lui sont majoritairement attribués : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice. Du point de vue électrique, cette couche adapte la largeur de la bande interdite entre l'absorbeur et la couche fenêtre [30] et limite les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. Elle permet également de protéger la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de ZnO, qui peut engendrer des défauts à la surface du CIGS [31].

Plusieurs semi-conducteurs de type n dont les bandes interdites sont entre 2,0 et 3,6 eV ont été appliquées comme tampon pour les cellules solaires CIGS. Cependant, le CdS déposé par bain chimique (CBD) reste préféré car il donne toujours des hauts rendements [32- 34]. Néanmoins, sa largeur de bande interdite, égale à 2 ,4 eV relativement faible engendre des pertes optiques, de sorte que des quantités importantes de lumière sont absorbées avant de pouvoir atteindre la couche CIGS, même pour les couches de CdS aussi minces que 50 nm.

Les photons absorbés dans le CdS ne contribuent pas au photocourant, à cause de la petite longueur de diffusion des porteurs minoritaires (trous) dans le CdS, ce qui conduit à un taux élevé de recombinaison. Pour cette raison, et en plus des contraintes liées à l'utilisation du

Cadmium (Cd) qui est un élément toxique, de nombreuses études sont menées pour substituer le CdS par d'autres matériaux, parmi eux, on peut citer (OH, S), Zn (O, OH), ZnS [31, 35] ou ZnSe [35-37].

II.12.5 Couche fenêtre en ZnO

La couche fenêtre doit être à la fois transparente, afin de laisser suffisamment de lumière à la région de jonction et la couche absorbante du dispositif, et conductrice pour permettre le transport du photocourant généré au circuit extérieur sans trop de pertes. Cette couche fenêtre est constituée d'oxyde transparent conducteur (TCO), sur lequel une fine grille métallique doublée (Ni-Al) est déposée de façon à réduire la résistance série de la couche fenêtre et de collecter les charges générées par le dispositif. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous-jacente du TCO. Le TCO, généralement utilisé pour les cellules CIGS, est l'oxyde de Zinc (ZnO) déposé par pulvérisation cathodique, mais l'oxyde d'Indium dopé à l'étain (ITO) peut être également rencontré [38].

Une bicouche ZnO est souvent utilisée pour le contact frontal transparent. La première couche est une couche mince de ZnO intrinsèque (i-ZnO), qui est typiquement de (50 -100 nm) d'épaisseur et très résistive. Elle sert à limiter la formation de court-circuit dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon [39]. La seconde couche est fréquemment du ZnO dopé à l'Aluminium (ZnO : Al), mais d'autres dopants comme le Bore (ZnO : B) [40] ou le Gallium (ZnO : Ga) [41] existent aussi. L'épaisseur et le dopage de cette couche sont ajustés de façon à combiner transparence et conductivité. La bande interdite de la couche fenêtre doit être aussi élevée et aussi mince que possible afin de maintenir une faible résistance série. Le ZnO et le ZnO : Al ont respectivement des bandes d'environ 3,2 eV et 3,6 à 3,8 eV.

II.12.6 Jonction p-n et diagramme d'énergie

La jonction p-n dans les cellules solaires CIGS est formée entre le semi-conducteur type p (CIGS) et le type n (CdS). Le diagramme d'énergie de bande de cette cellule est représenté sur la figure (II.15). La différence des affinités électroniques des deux matériaux constituant la jonction se traduit par une discontinuité de bande interdite. La courbure de la bande de conduction ou ΔEc (Conduction Band Offset) entre le CIGS et le CdS est par convention positive, ce qui signifie que la bande de conduction de CdS est supérieure à celle de CIGS.

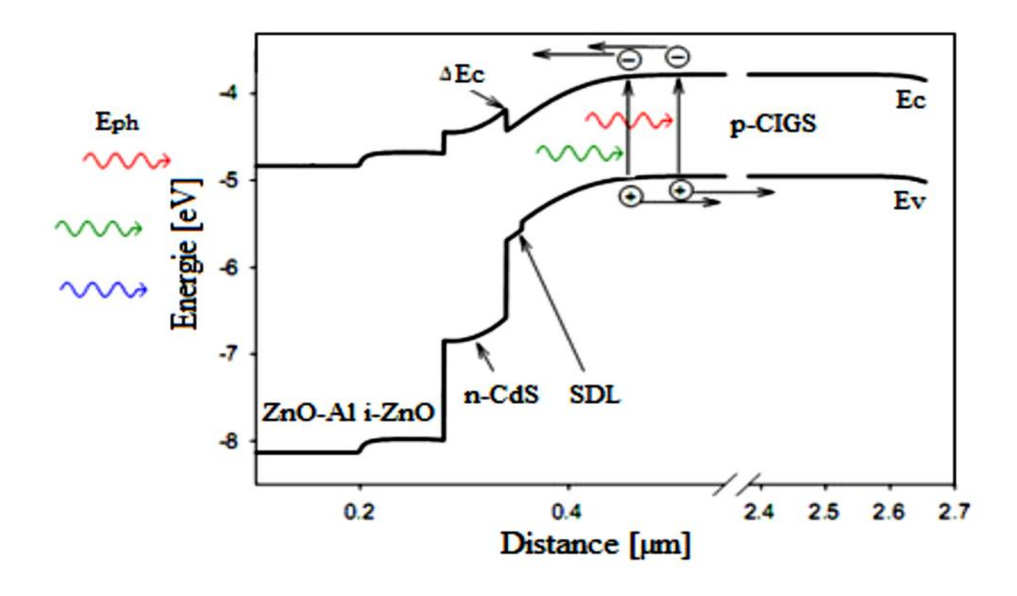


Fig.II.15 : Structure de bande d'une cellule solaire $Cu(In, Ga)Se_2$.

La valeur optimale de la courbure de la bande de conduction est ΔEc = 0,3 eV est obtenue pour un gap de CIGS=1,15 eV. Une courbure de la bande de conduction supérieure à 0,5 eV crée une barrière forte pour les électrons photo- générés limitant ainsi, le transport du courant. En revanche, une courbure de la bande de conduction nulle ou négative conduit à une augmentation de la recombinaison à l'interface, ce qui limite la tension de la cellule.

La présence d'une couche de type inversé (type n) identifiée comme étant une couche de défauts de surface ou SDL (Surface Defect Layer) à la surface du matériau CIGS était rapportée par plusieurs auteurs [42]. Elle possède un gap plus large que le CIGS, ce qui permet de réduire la recombinaison à l'interface CdS/CIGS et contribue ainsi à l'amélioration des performances de la cellule [43, 44].

Le tableau II.1 regroupe certains paramètres physiques de la cellule à base de CIGS.

Propriété	CIGS	CdS	ZnO
E_g(eV)	Varie (1.011/1.68)	2.4	3.3
χ_e (cm^{-3})	4.58	4.4	4.4
ε_r	13.6	10	9
$N_c(cm^{-3})$	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
$N_v(cm^{-3})$	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
$\mu_n(cm^2/Vs)$	100	100	100
$\mu_p(cm^2/Vs)$	25	25	25
N_a Ou $N_d(cm^{-3})$	N_a =2x10^{16}	N_d =10^{17}	10^{17}
m_e	$0.2m_0$	$0.9m_0$	$0.9m_0$
m_t	$0.8m_0$	$0.8m_0$	$0.8m_0$
τ_n ou τ_p (s)	τ_n =2×10^{-9}	τ_p =10^{-13}	/
S_n ou S_p (cm/s)	S_n =10^7	S_p =10^7	/

Tableau II.1 : Paramètres physiques des matériaux de la cellule solaire en CIGS [45].

II.13 Contenu de Ga dans la cellule solaire en CIGS

Le rendement d'une cellule solaire est déterminé à partir de la caractéristique I-V de la cellule solaire ainsi la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit et le facteur de forme qui constituent les facteurs de qualité de la cellule solaire. Une augmentation de la bande interdite de l’absorbeur en augmentant ainsi le contenu de Ga dans x=Ga/(In+Ga), conduit à une augmentation proportionnelle de V_{co}. L’accroissement de la bande interdite entraîne une augmentation de la tension en circuit ouvert et du facteur de forme.

La réponse spectrale d'une cellule solaire en CIGS avec la variation de la composition Ga est montrée sur la figure II.16. La réduction des performances avec une augmentation de la composition de Ga peut se justifier du fait de l’augmentation de la bande interdite de l’absorbeur et il y’aura moins de la contribution de photons, qui pénètrent plus profondément et générant le photocourant.

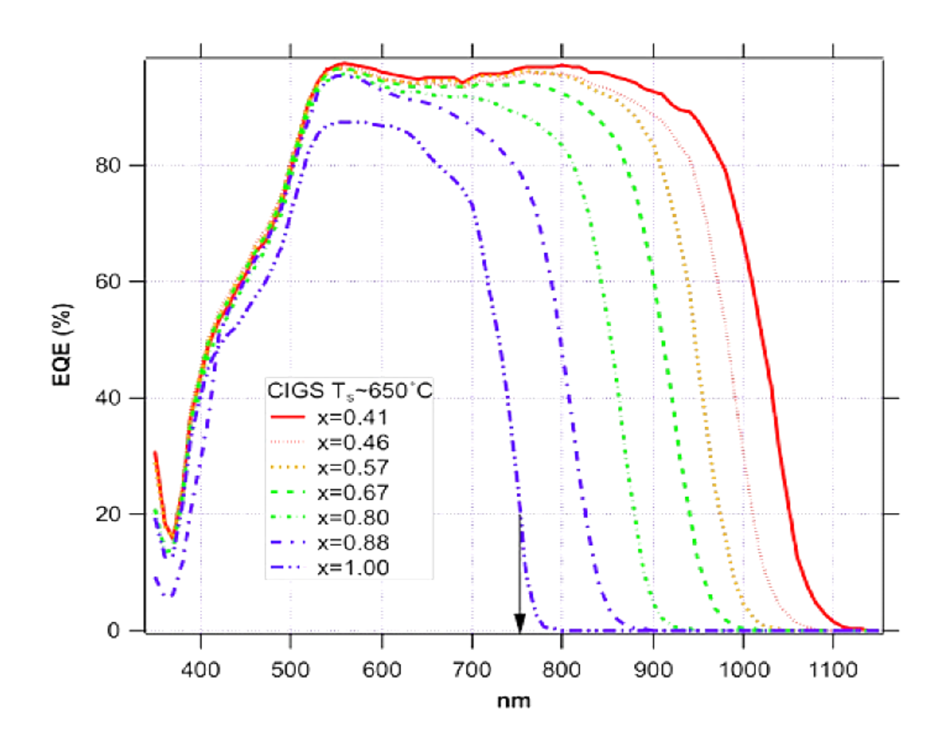


Fig.II.16 : Réponse spectrale d'une cellule en CIGS pour différentes proportions x de Ga [46].

Des exemples de caractéristiques I-V pour trois bandes interdites différentes sont représentés sur la figure II.17. On remarque que plus la bande interdite augmente, la tension en circuit ouvert augmente aussi contrairement au courant de court-circuit qui diminue.

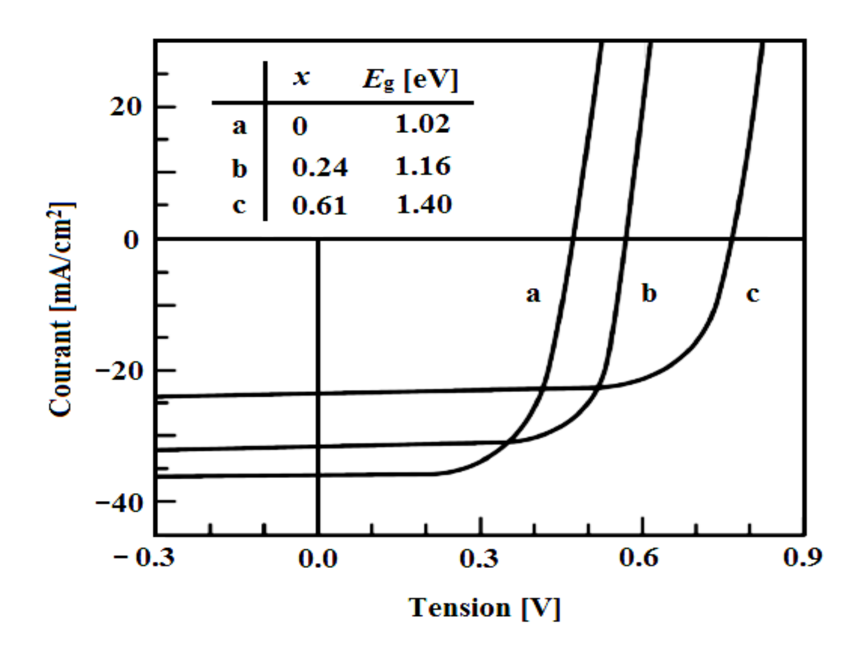


Fig. II.17 : caractéristiques I-V pour trois bandes interdites différentes [47].

II.14 Avantages de la fabrication des cellules solaires en CIGS

L'utilisation de cellules solaires en CIGS a le potentiel de diriger le marché des cellules solaires en couches minces. Cela est dû aux nombreux avantages que les cellules en CIGS offrent à la fois au fabricant et au consommateur. Comme la recherche continue à améliorer à la fois le rendement des cellules et la réduction des coûts de fabrication, les cellules solaires en CIGS ont le potentiel d'acquérir la majorité de la part du marché des couches minces [48].

II.14.1 Fabrication peu coûteuse

Un des principaux avantages de cellules en CIGS est qu'elles peuvent être commercialement fabriquées à une fraction du coût par rapport aux cellules solaires en Si. Les cellules cristallines de Si doivent être fabriquées avec le silicium extrêmement pur. Une fois qu'un fabricant a abouti au silicium avec une assez grande pureté, le matériau doit être chauffé à des températures extrêmement élevées pour se former dans une structure cristalline. Le lingot du silicium cristallin est ensuite découpé en plaquettes qui doivent subir de nombreuses étapes de gravure et de dopage avant qu'un produit final soit atteint [49]. Ce processus est très long et coûteux pour le fabricant.

Les cellules solaires en couches minces, comme en CIGS peuvent être produites de manière beaucoup plus efficace. Le matériau CIGS peut être déposé sur le substrat et le contact arrière par un procédé appelé déposition qui permet aux éléments de s'adhérer sur le substrat à une température suffisamment élevée. Ce processus ne nécessite pas des tolérances élevées par rapport aux cellules en Si et il est globalement un processus plus facile pour la fabrication [50]. En plus des avantages de la déposition, le CIGS peut être fabriqué avec une technique appelée sur rouleaux (" roll-to-roll "). La fabrication " roll-to-roll " est illustrée sur la figure II.18.

Avec la technique de fabrication "roll-to-roll ", les sociétés peuvent produire des cellules solaires à grande échelle. Une fois le substrat flexible est déroulé, il subit plusieurs processus qui consistent à déposer l'ensemble des couches sur le substrat. Le processus réduit considérablement le temps de production mais permet également un cycle de production continu. Plutôt que de couper des plaquettes individuelles de Si, la fabrication roll-to-roll supporte une feuille continue de cellules solaires produites. Ce processus est si efficace qu'il a permis à des sociétés comme Miasolé et Solibro d'offrir des cellules solaires CIGS avec un prix de 1 $ / W [51].

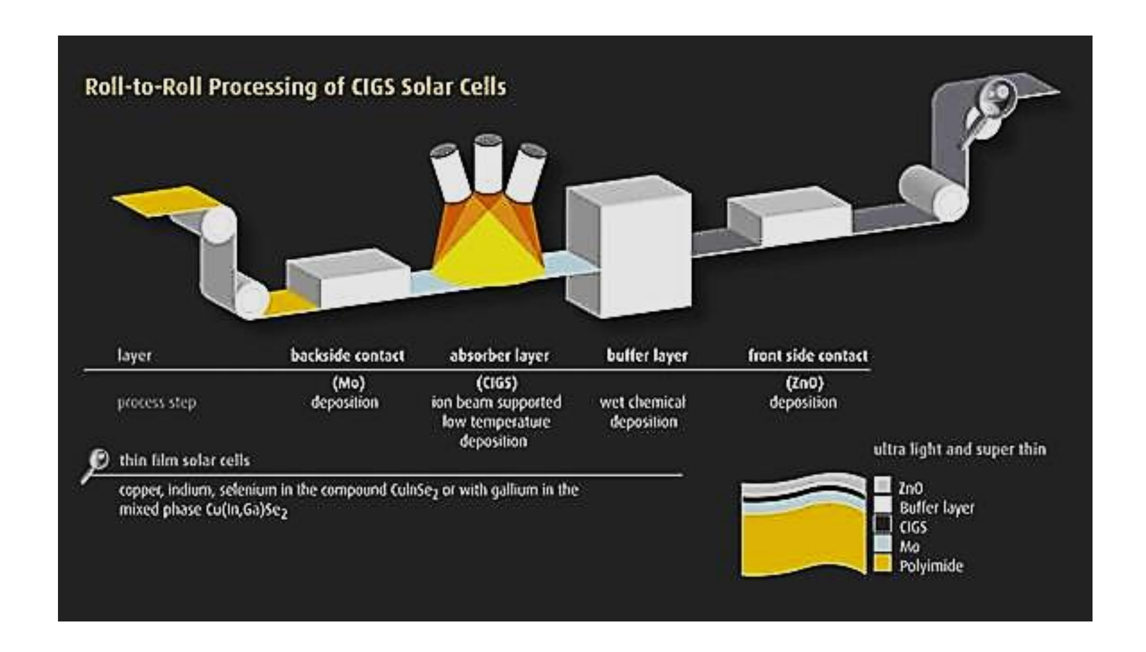


Fig.II.18 : Le processus de fabrication " roll-to-roll " de la cellule solaire CIGS.

II.14.2 Flexible

La flexibilité des cellules CIGS produites sur un substrat métallique mince est aussi un avantage énorme. Cette flexibilité donne au CIGS un avantage par rapport aux cellules Si conventionnelles en ce qui concerne le montage. Une cellule Si standard possède des propriétés compatibles avec un panneau en verre qui rend une cellule Si rigide mais cassante, ceci limite les options de mise en œuvre de panneaux solaires. La nature flexible de cellules solaires CIGS leur permet d'être montées sur des structures qui ne peuvent pas être parfaitement plates. La recherche a montré que le montage des cellules CIGS est très pratique et avec une grande dureté sur des avions sans pilotes [52].

II.14.3 Poids léger

Le sous-produit d'être mince et flexible est aussi léger. Étant léger a ses avantages pour les personnes qui souhaitent prendre leurs cellules solaires avec eux lorsqu'ils voyagent. Leur portabilité reste hors de portée pour les cellules à base de Si.

II.14.4 Etat actuel de la technologie

La recherche scientifique continue d'améliorer le rendement observé dans les cellules en CIGS fabriquées. Le rendement record du laboratoire national d'énergies renouvelables

(NREL) pour de nombreuses technologies de cellules solaires par rapport à la date à laquelle le rendement a été enregistré est présenté dans la figure II.19.

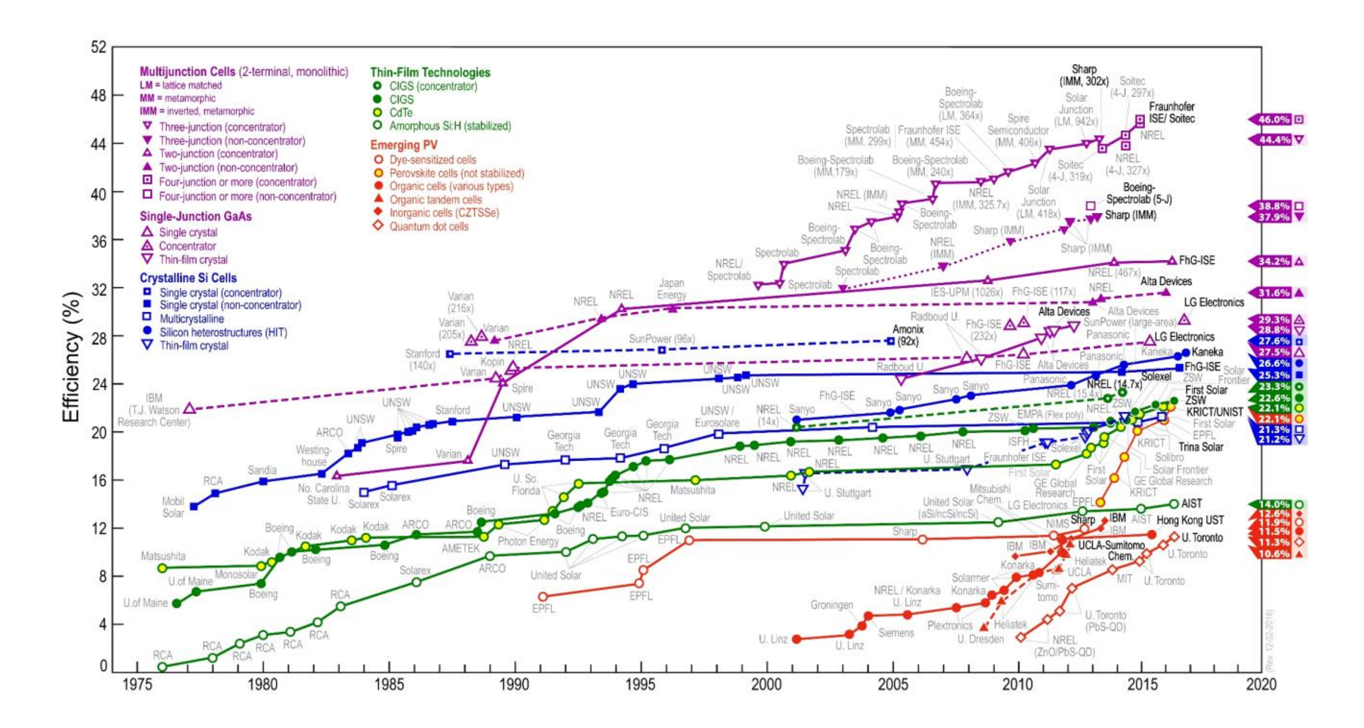


Fig.II.19 : Meilleurs rendements des cellules solaires du laboratoire NREL en fonction du temps [53].

II.15 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les bases fondamentales à la compréhension de la cellule solaire. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres qui influent sur leurs caractéristiques. Nous avons aussi présenté la structure et quelques notions sur les cellules solaires à base de CIGS.

Références du chapitre II

[1] Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, «Applied Photovoltaic», Bridge Printer, Sidney,1994.

[2] M. Cooke, "Lighting up CIGS PVs," Semiconductor today, compounds & advanced Silicon, Vol. 3, Issue 1, pp. 56, Feb. 2008.

[3] Énergie solaire photovoltaïque — Wikipédia

[4] SERDOUK Mohammed Ridha, « Etude par simulation numérique des propriétés électriques d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) »,Thème De Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015,p 23-25

[5] Naïma Touafek, « Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ », THESE DE DOCTORAT, Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2015, p22-27

[6] Charles Roger, Thèse « Développement De Cellules Photovoltaïques A Base De Cigs Sur Substrats Métalliques », Université De Grenoble,2013, P19-23

[7] Jeffery L. Gray. The Physics of the Solar Cell. In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, pages 82–129. 2011.

[8] Y. Sayade, « Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière », thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, 2009.

[9] Djicknoum DIOUF, « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure inter digitée en face arrière », Thèse De Doctorat, Université Paris-Sud 11, 2010, p8-10

[10] OUDDAH MOURAD, « étude du silicium poreux destine aux cellules solaires », thème de MAGISTER, Université Mentouri Constantine, 2009, p 8

[11] Mecheri Abdeslem, Sandali Abd Elaziz, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) », Thème De Master, Universite Kasdi Merbah Ouargla, 2015, p 13, 20

[12] H. Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 2ème Edition, Masson, 1990.

[13] BEZZIOU FATMA, "Etude par simulation numérique d'une cellule solaire à homojonction (GaAs) et à hétérojonction (Ga0.3Al0.7As/GaAs) par le logiciel TCAD-SILVACO », Thème De Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015, p 24

[14] Souici Fatma-Zohra, "Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe2)", thème de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009, p22-23

[15] Amar Hichem, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSéléniure de Cuivre Indium Galium $CuIn_{(1-x)}GaxSe_2$ (CIGS) », thème de MAGISTER, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014, p 29-32

[16] Jean-Claude MULLER, « Électricité photovoltaïque-Filières et marché », Institut d'électronique du solide et des systèmes InESS (UMR 7163, CNRS-ULP), 2008, p5

[17] Entreprises Concentrix Solar et SolFocus projet de 3MW CPV en Espagne. Déjà 500kW installé sur les sites de Puertollano et Almoguera, disponible sur :

www.concentrix- solar.de & www.solarfocus.com dernière consultation 2010

[18] Stéphane Petibon; « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », THÈSE DOCTORAT, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009, p19,25-27

[19] Linda Saad Hamideche, « Etude des propriétés du matériau ternaire $CuInSe_2$ à base de Cu de la famille des chalcopyrites $Cu\text{-}III\text{-}VI_2$ », Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2012, p8,9

[20] OUSSIDHOUM Samira, "etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simple et multiple", thème de magister, Université mouloud Mammeri de tizi-ouzou ,2015, p18

[21] disponible sur : http://www.nrel.gov/pv/copper-indium-gallium-diselenide-solar-cells.html

[22] F. Kessler, D. Herrmann and M. Powalla, « Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells », Thin Solid Films, Vol. 480-481, 2005, pp. 491

[23] K. Granath, M. Bodegard and L. Stolt, « The effect of NaF on Cu(In,Ga)Se2 thin film solar cells », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 60, 2000, pp. 279.

[24] K. Orgassa, H. W. Schock and J. H. Werner, « Alternative back contact materials for thin film Cu(In,Ga)Se2 solar cells »,Thin Solid Films, Vol. 431–432, 2003, pp. 387.

[25] R. J. Matson, O. Jamjoum, A. D. Buonaquisti, P. E. Russell, L. L. Kazmerski, P. Sheldon and R. K. Ahrenkiel, « Metal contacts to CuInSe2 », Solar cells, Vol. 11,1984, pp. 301.

[26] N. Kohara, S. Nishiwaki, Y. Hashimoto, T. Negami and T. Wada, « Electrical properties of the Cu(In,Ga)Se2/ MoSe2/Mo structure », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 67, 2001, pp. 209.

[27] M. Kemell, M. Ritala and M. Leskelä, « Thin Film Deposition Methods for CuInSe2 Solar Cells », Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, Vol. 30, 2005, pp. 1.

[28] M. Powalla and B. Dimmler, « Scaling up issues of CIGS solar cells », Thin Solid Films, Vol. 361–362, 2000, pp. 540.

[29] A. Duchatelet, « Synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se2 pour cellules solaires par électro dépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium », Thèse de Doctorat, université de Lille1, 2012.

[30] M. Buffiere, « Synthèse et caractérisation de couches minces de Zn(O,S) pour application au sein des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se2 », Thèse de doctorat, université de Nantes, 2011.

[31] N. Naghavi, D. Abou-Ras, N. Allsop, N. Barreau, S. Bücheler, A. Ennaoui, C.H. Fischer, C. Guillen, D. Hariskos, J. Herrero, R. Klenk, K. Kushiya, D. Lincot, R.Menner and T. Nakada, «Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)2 based thin film photovoltaics : present status and current developments », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol.18, 2010, pp. 411.

[32] P. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann and M. Powalla, « New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se2 thin-film solar cells beyond 20% », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 19, 2011, pp 894.

[33] I. Repins, M. A. Contreras, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, C. L. Perkins, B. To and R. Noufi, « 19.9%-efficient ZnO/CdS/CuInGaSe2 Solar Cell with 81.2% Fill Factor », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 16, 2008, pp. 235.

[34] E. Wallin, U. Malm, T. Jarmar, O. Lundberg, M. Edoff and L. Stolt, « World-record Cu(In,Ga)Se2-based thin-film sub-module with 17.4% efficiency », Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 20, 2012, pp. 851.

[35] A. Romeo, M. Terheggen, D. Abou-Ras, D. L. Batzner, F. J. Haug, M. Kalin, D. Rudmann and A. N. Tiwari, « Development of thin-film Cu(In,Ga)Se2 and CdTe solar cells », Progress in Photovoltaics: research and Applications, Vol. 12, 2004, pp. 93.

[36] M. Kemell, M. Ritala and M. Leskelä, « Thin Film Deposition Methods for CuInSe2 Solar Cells », Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, Vol. 30, 2005, pp. 1.

[37] C. H. Fischer, M. Bär, T. Glatzel, I. Lauermann, and M. C. Lux-Steiner, « Interface engineering in chalcopyrite thin film solar devices », Solar energy materials and solar cells, Vol. 90, 2006, pp. 1471.

[38] T. Nakada, Y. Hirabayashi, T. Tokado, D. Ohmori and T. Mise, « Novel device structure for Cu(In,Ga)Se2 thin film solar cells using transparent conducting oxide back and front contacts», Solar Energy, Vol. 77, 2004, pp. 739.

[39] U. Rau, P. O. Grabitz and J. H. Werner, « Resistive limitations to spatially inhomogeneous electronic losses in solar cells », Applied Physics Letters, Vol. 85, 2004, pp. 6010.

[40] Y. Hagiwara, T. Nakada and A. Kunioka, « Improved Jsc in CIGS thin film solar cells using a transparent conducting ZnO:B window layer », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 67, 2001, pp. 267.

[41] B. Sang, K. Kushiya, D. Okumura and O. Yamase, « Performance improvement of CIGSbased modules by depositing high-quality Ga-doped ZnO windows with magnetron sputtering », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 67, 2001, pp. 237.

[42] D. Schmid, M. Ruckh, F. Grunwald and H. W. Schock, « Chalcopyrite/defect chalcopyrite heterojunctions on the basis of CuInSe2 », Journal of Applied Physics, Vol. 73, 1993, pp. 2902.

[43] Y. Yan, K. M. Jones, J. Abushama, M. Young, S. Asher, M.M. Al-Jassim and R. Noufi, « Microstructure of surface layers in Cu(In,Ga)Se2 thin films », Applied Physics Letters, Vol. 81, 2002, pp.1008.

[44] S. M. Lee, S. Ikeda, Y. Otsuka, W. Septina, T. Harada and M. Matsumura, « Homogeneous Electrochemical deposition of in ona Cu-covered Mo Substrate for fabrication of efficient solar cells with a CuInS2 photo absorber », Electrochimica Acta, Vol. 79, 2012, pp.189.

[45] M. Gloeckler, A. L. Fahrenbruch, et J. R. Sites, in Proc. 3rd World Conf.Photovoltaic Energy Conversionm, vol. 1, (2003) pp. 491–494.

[46] Fotis Konstantinos, << Modeling and Simulation of a Dual-Junction CIGS Solar Cell Using Silvaco Atlas >>, Naval Postgraduate School Monterey, california ,2012, p 39

[47] Douglas A. Columbus, << Design And Optimization Of Copper Indium Gallium Selenide Solar Cells For Lightweight Battlefield Application>>, Naval Postgraduate School Monterey, california ,2014, p 28

[48] R. Noufi and K. Zweibel, “High efficiency CdTe and CIGS thin-film solar cells: highlights and challenges” in Conf. Record of the IEEE 4th World Conf., Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, HI, 2006, pp. 317-320.

[49] Solar World, Solar Energy 101, Making Solar Panels [online]. Available

http://www.solarworld-usa.com/solar-101/making-solar-panels

[50] H. Sankaranarayanan, “Fabrication of CIGS absorber layers using a two-step process for thin film solar cell applications,” Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Univ. South Florida, Tampa, FL, 2004.

[51] Optics.Org. (2010 Nov. 01). Taiwan investors push Solarion to mass production [online]. Available http://optics.org/news/1/6/2

[52] J. V. Coba, “Application of Copper Indium Gallium Diselenide photovoltaic cells to extend the endurance and capabilities of the Raven RQ-11b unmanned aerial vehicle,” M.S. thesis, Dept. Elec. Eng., NPS, Monterey, CA, 2010.

[53] disponible online: www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency_chart.jpg

Chapitre III
Le Simulateur Atlas-Silvaco

III.1 Introduction

SILVACO (Silicon Valley Corporation) est une société Américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont employés par les compagnies de microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs [1].

Les simulateurs TCAD permettent la modélisation du comportement électrique d'un composant électronique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Les simulateurs existants sur le marché (ISE, SYNOPSIS, SILVACO, …) ont le même principe de fonctionnement [2].

Dans ce chapitre, nous allons présenter le logiciel de simulation TCAD-SILVACO, son principe de fonctionnement, et ces modules de simulation : ATHENA pour la simulation des processus technologiques [3], et ATLAS pour la simulation du comportement électrique des composants [4]. Nous allons aussi donner les différentes commandes (instructions) et les bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur ATLAS.

III.2 Présentation du package des programmes SILVACO

SILVACO présente un ensemble des outils de simulation interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs à semiconducteurs VWF (Virtual Wafer Fab) [1]. Les composants de base de VWF (Figure III.1) sont [1,5] :

1. Les outils de simulation (VWF CORE TOOLS). Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication ou soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont ATHENA, ATLAS et SDUPEM3.

2. Les outils interactifs (VWF INTERAVTIVE TOOLS). Ces outils sont désignés pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée. En étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI). Ainsi le travail de construction du fichier d'entrée devient plus efficace. Les outils interactifs peuvent être utilisés soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l'environnement des outils d'automatisation.

3. Les outils d'automatisation (VWF AUTOMATION TOOLS). Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales afin de créer des résultats pour l'analyse statistique suivante. Les outils automatiques se servent de la technologie de base de données réparties et des méthodes de logiciels de développement d'interprocessus.

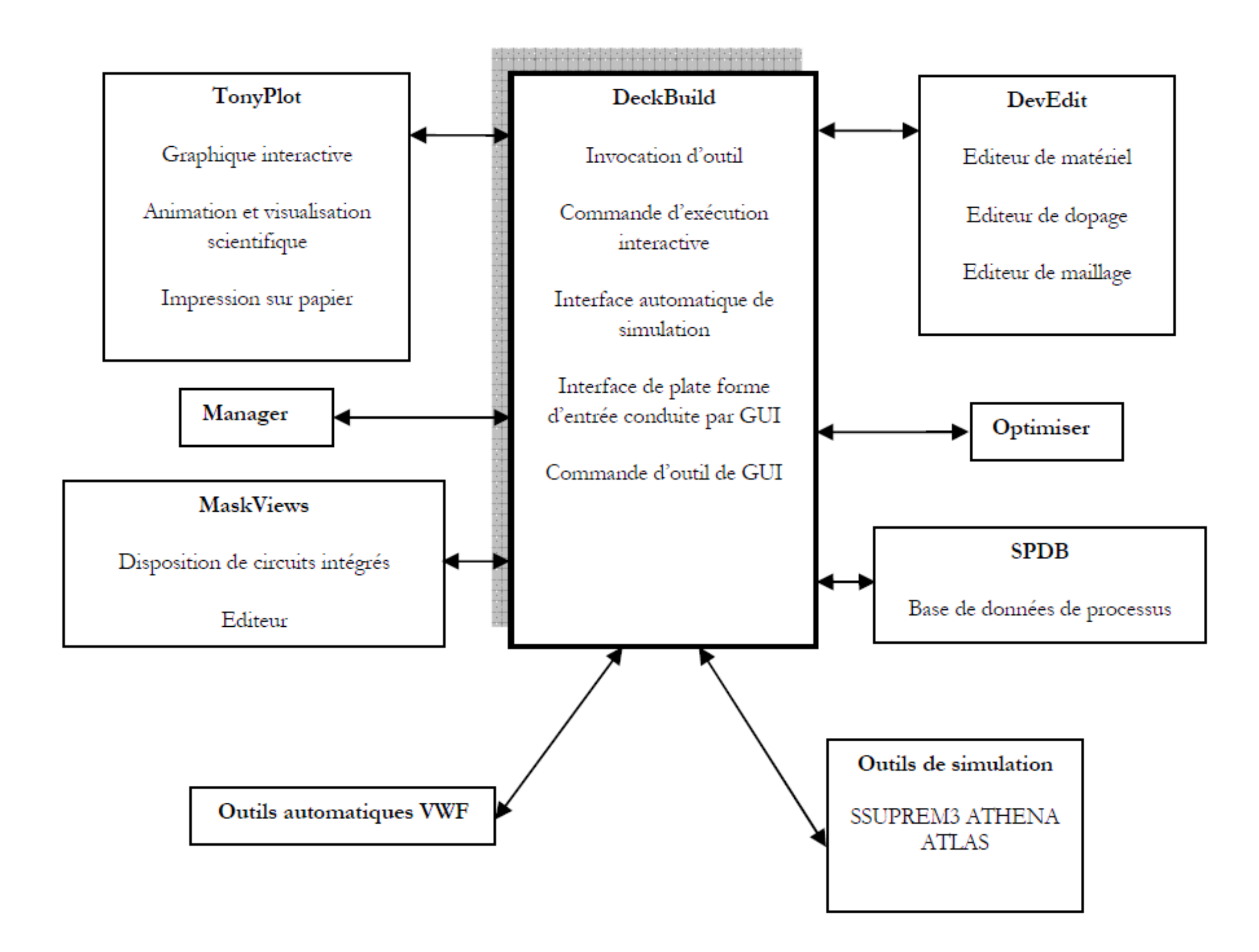


Fig.III.1 : Organigramme de la structure VWF [1].

III.2.1 Les outils de simulation

- **ATLAS** : simulateur physique de dispositifs à semiconducteur 2D ou 3D qui permet de simuler le comportement électrique de structures spécifiées des dispositifs à semiconducteur [1].
- **ATHENA** : simulateur 2D de procédés technologiques qui permet de développer et optimiser des processus de fabrication de semiconducteur (les différentes étapes effectuées en Salle Blanche). Il fournit une plate-forme pour simuler l'implantation ionique, la diffusion, la gravure, le dépôt, la lithographie et l'oxydation. Il remplace des expériences coûteuses par des simulations [1].
- **SSUPREM3** : simulateur de procédé 1D permet la prédiction des profils de dopage et les épaisseurs produits par le traitement des semi-conducteurs, il est capable de simuler un flux complet d'étapes de processus [1].

III.2.2 Les outils interactifs

- **DECKBUILD** : environnement où est défini le programme de simulation. DeckBuild offre une aide et une prise en charge qui permet d'éviter l'apprentissage d'une syntaxe de commande généralement très complexe. Il permet aussi une exécution automatique et très pratique des programmes et des sauvegardes systématiques des étapes intermédiaires d'exécution [1].
- **TONYPLOT** : environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du composant, distribution de grandeurs divers dans celui-ci, caractéristiques électriques…).
- **DEVEDIT** : environnement où est dessinée la structure. On peut créer des nouvelles structures ou même modifier des structures existantes. On peut aussi définir des maillages ou raffiner les maillages existants [1].
- **MASKVIEWS** : outil de dessin des masques (éditeur de layout) [1].
- **OPTIMIZER** : optimise les paramètres de la structure de façon à obtenir en final la valeur du paramètre que nous lui avons définie au préalable [1].
- **MANAGER** : outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF [1].
- **SPDB** : (Semiconductor Process Data Base), c'est un produit séparé, il n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement ainsi que les données qui décrivent les conditions des expériences [1].

III.3 Présentation d'ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS (de SILVACO) permet la modélisation 2D et 3D des composants. Cet outil sert à la modélisation des dispositifs à semi-conducteur avant leur fabrication. Il est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherches.

Dans la figure III.2, nous présentons les informations d'entrée et de sortie pour ATLAS.

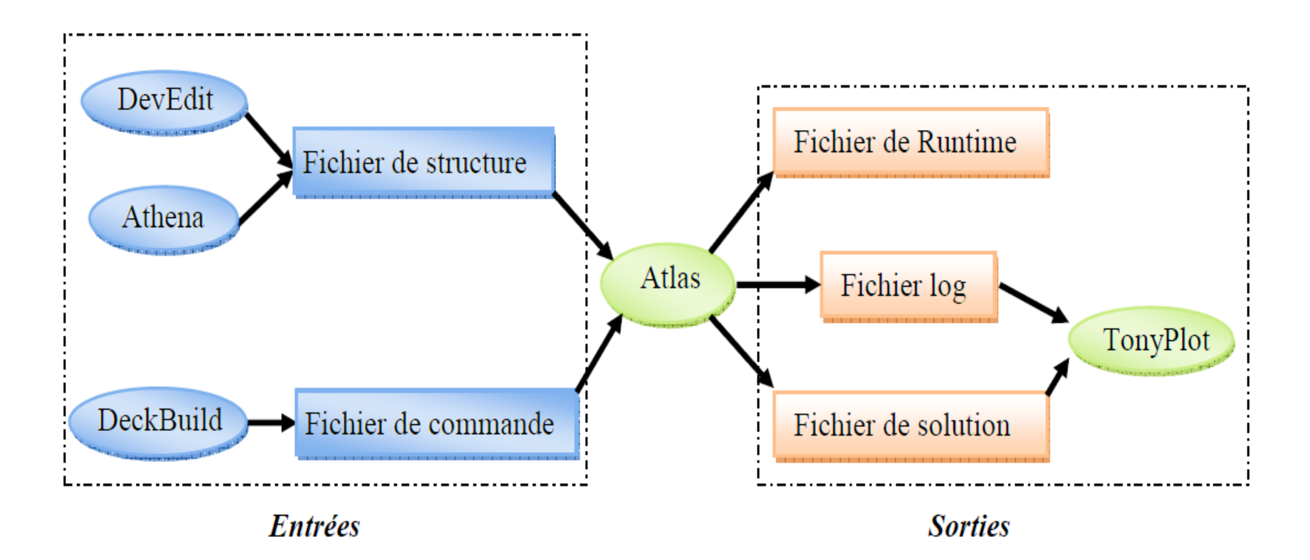


Fig.III.2 : Entrées/sorties du simulateur Atlas [6].

La plupart des simulations réalisées par ATLAS utilisent deux fichiers d'entrée [6] :

- Un fichier script contenant les commandes pour que ATLAS s'exécute (environnement DECKBUILD utilisé),
- Un fichier structure définissant l'empilement à simuler.

Le simulateur fournit 3 types de fichiers de sortie :

- Un fichier Runtime qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation.
- Un fichier log stockant toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simule (c'est le fichier du comportement électrique),
- Un fichier solution stockant les données 2D et 3D correspondant aux valeurs de variables spécifiques à l'intérieur du dispositif, à une tension donnée.

Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation TonyPlot. Tonyplot permet de visualiser la structure en 2D ou 3D et les caractéristiques électriques demandées.

III.4 Commandes dans un programme ATLAS

Nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes fondamentales dans un programme ATLAS (Figure III.3). Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement. Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte.

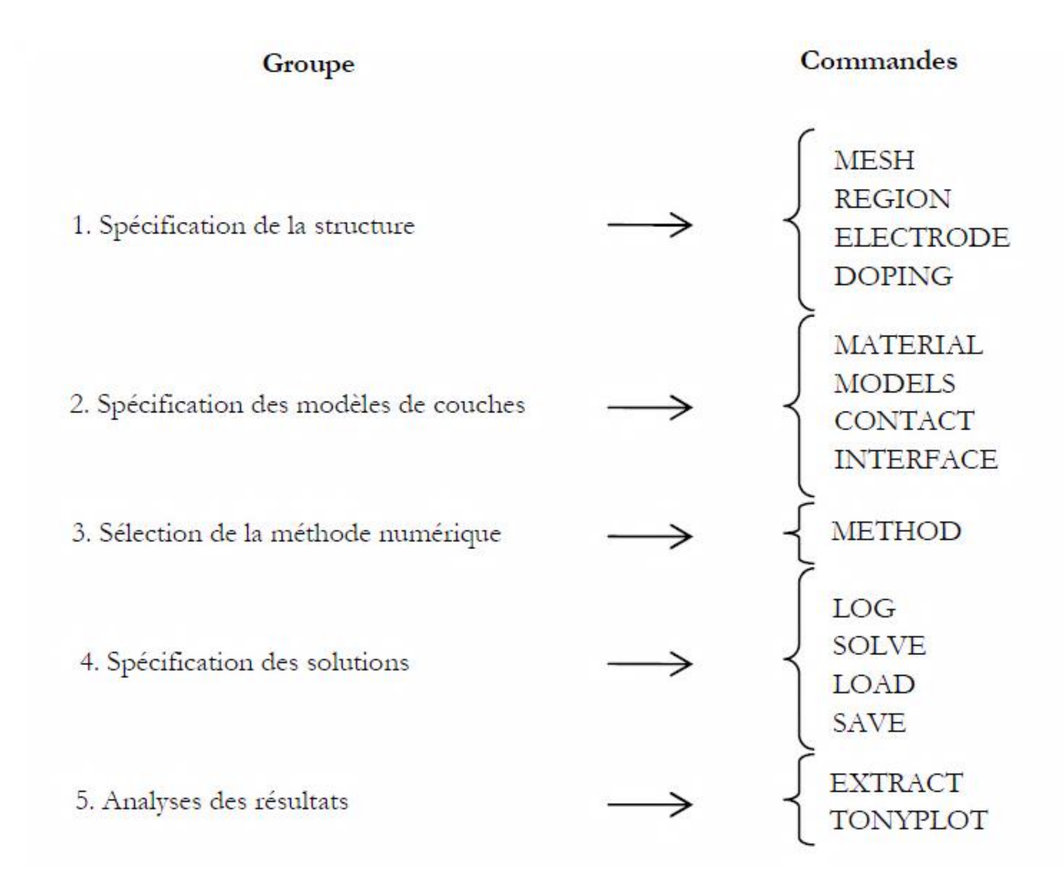


Fig.III.3 : Les commandes fondamentales dans un programme ATLAS [1].

III.4.1 Spécification de la structure

Il s'agit de définir la structure la plus réaliste. La construction de la structure consiste en quatre étapes : définition du maillage, définition des régions, définition des électrodes et définition des dopages, d'après [7,8] :

- **MESH** (définition du maillage) : Le maillage divise la structure simulée en petites cellules pour pouvoir résoudre les équations fondamentales numériquement. L'élément de maille utilisé est le triangle. Pour assurer une bonne précision lors de la simulation, il faut avoir le maillage le plus fin possible. Par contre si le maillage est très fin, le temps de calcul est très élevé, car il y a plus d'éléments à calculer. Le format général pour définir la maille est :

X. MESH LOCATION = <VALEUR> SPACING = <VALEUR>

Y. MESH LOCATION = <VALEUR> SPACING = <VALEUR>

La figure III.4 montre le maillage de notre structure.

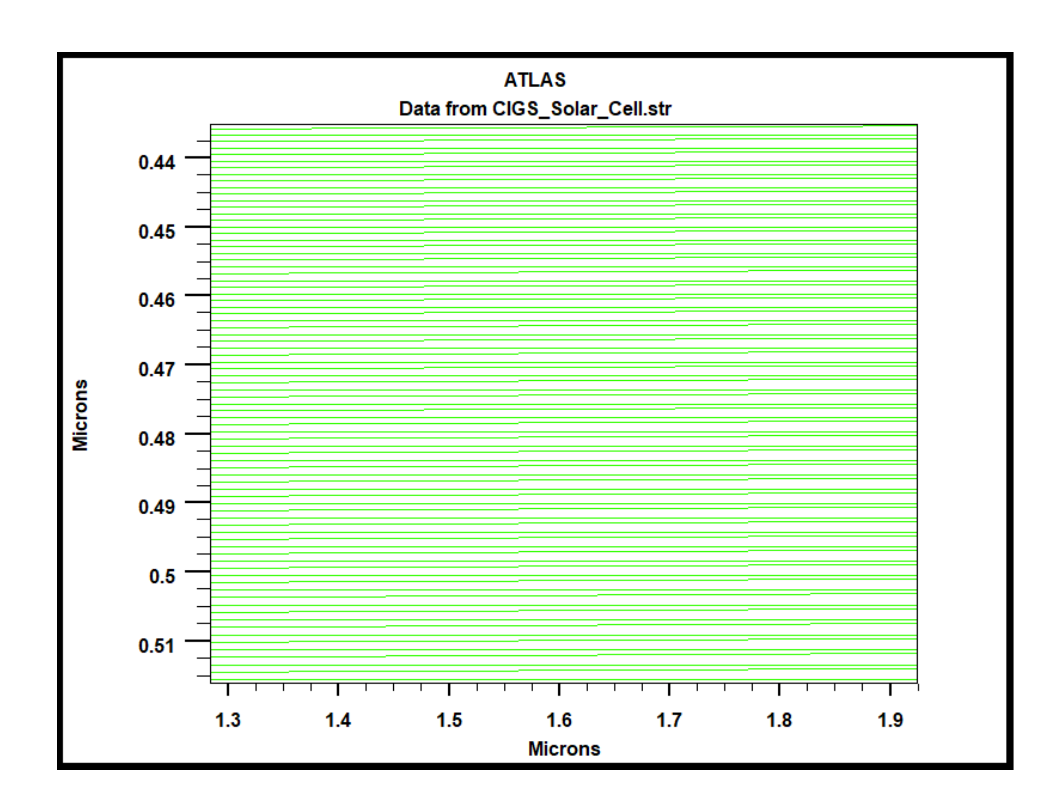


Fig.III.4 : Maillage du dispositif.

- **REGION** (définition des régions) : Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions dont le format de définition des régions avec dimensions en micromètre est le suivant :

REGION nombre = <integer><material_type>< position des paramètres >

La figure III.5 montre la façon de définition des matériaux pour chaque région. Notons que le code de couleur indique le matériau. Les régions ont des lignes horizontales pour marquer leurs limites.

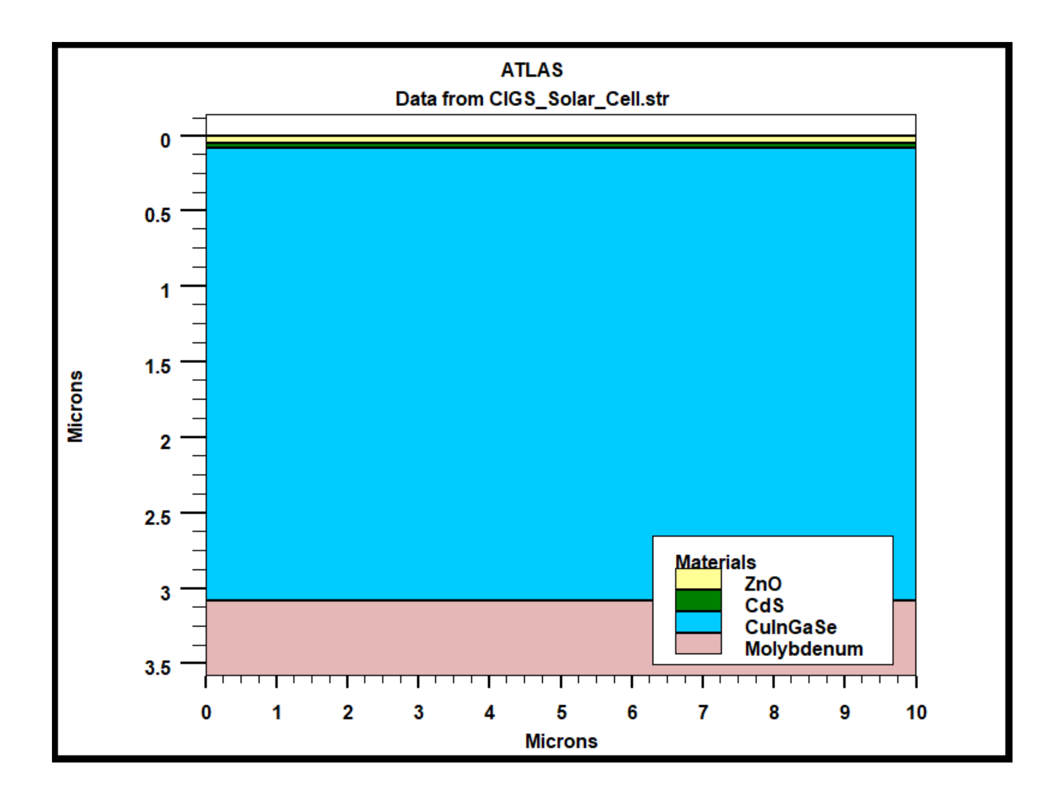


Fig.III.5 : Définition des régions et des matériaux par le logiciel ATLAS.

- **ELECTRODE** : Atlas a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition d'électrodes est comme suite :

ELECTRODE name = < nom de l'électrode >< position des paramètres >

Les positions des électrodes sont localisées par les instructions suivantes :

X.MIN : Spécifie le point de départ de l'électrode.

RIGHT : la position de l'électrode se situe à la droite de la structure (inverse : LEFT).

TOP : la position de l'électrode est en haut de la structure (inverse : BOTTOM).

La figure III.6 montre la position de l'anode et la cathode dans la structure.

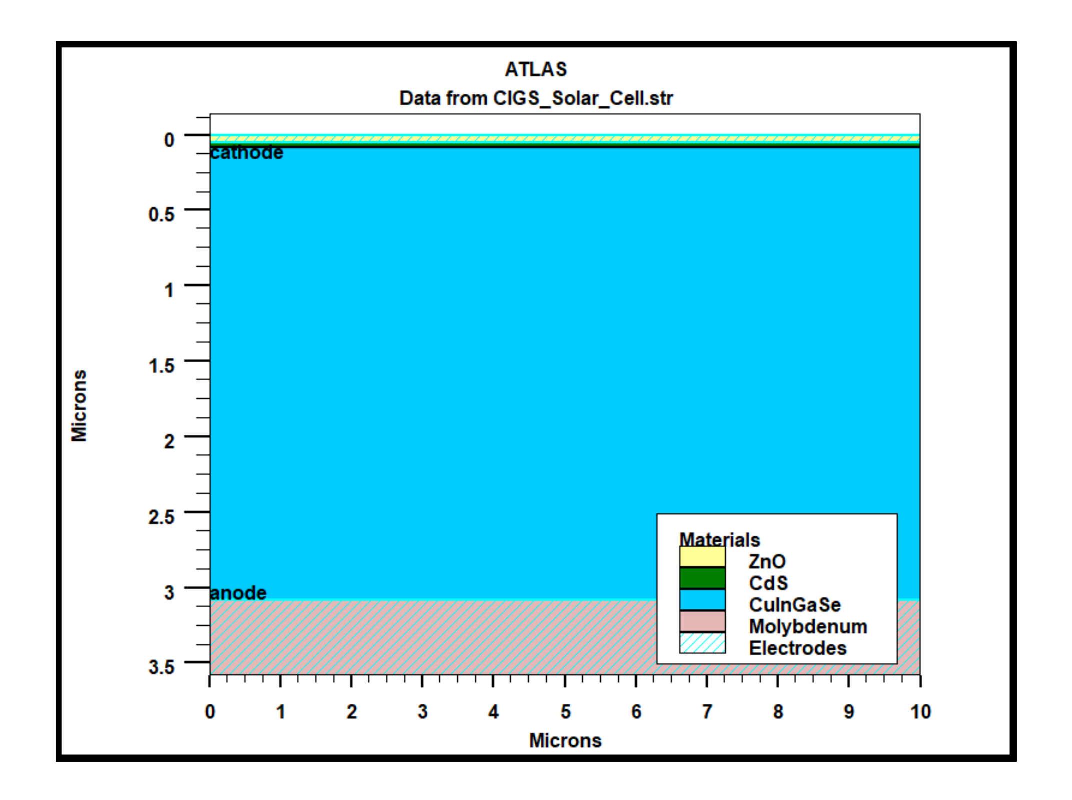


Fig.III.6 : Définition des électrodes par le logiciel ATLAS.

- **DOPING (**définition des dopages) : Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type n ou p, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien, etc…

Le format de la déclaration de dopage dans ATLAS est comme suite :

DOPING< type de distribution >< type de dopant >< position des paramètres >

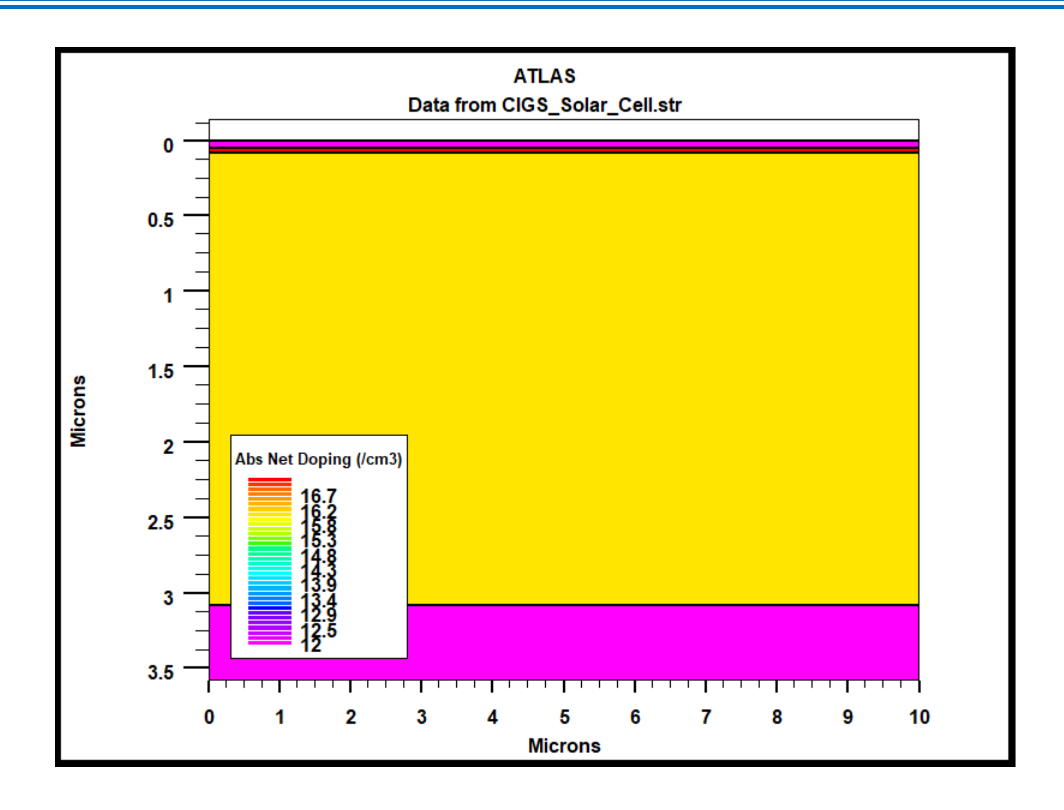


Fig.III.7 : Distribution du dopage dans une structure par le logiciel ATLAS.

III.4.2 Spécification des modèles

Après la construction de la structure, il est nécessaire de préciser les modèles physiques et de définir les matériaux. La spécification de modèles et matériaux comporte les étapes [5, 9, 10] :

- **MATERIAL** : Le format de la déclaration du matériau est le suivant :

MATERIAL < localisation >< définition du matériau >

Exemple :

MATERIAL MATERIAL=CdS EG300=2.42 PERMITTIVITY=10 \
AFFINITY=4.5 MUN=100 MUP=25 NC300=2.2e18 NV300=1.8e19.

Plusieurs autres paramètres peuvent être définis par la déclaration MATERIAL, comme exemples de ces paramètres : l’énergie du gap (EG300), la permittivité (PERMITIVITY), l’affinité (AFFINITY), la mobilité d'électrons (MUN), la mobilité de trous (MUP), la densité d’états en Ec (NC300) et la densité d’états en Ev (NV300).

- **MODELS** : Ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques (recombinaison, mobilité, etc…). Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

  La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante :

  MODEL< paramètres générales >< paramètres du modèle >

  Exemple : SRH CONMOB FLDMOB.

  SRH est le modèle de Shockley-Read-Hall. CONMOB est le modèle de la mobilité dépendante de la concentration du dopage. FLDMOB est le modèle de la mobilité dépendante du champ électrique.

- **CONTACT** : Il existe aussi les modèles qui concernent le type de contact soit contact ohmique qui connaît par défaut et le contact redresseur (contact de Schottky), ce contact est reconnu par un travail de sortie (work function) comme :

  Contact name= < integer > work=< integer >

  Voici un exemple des contacts déclaration :

  Contact name =anode workfun= 4.74

- **INTERFACE** : Les limites des semiconducteurs ou des isolants sont déterminées par la déclaration « interface ». La syntaxe est la suivante :

  INTERFACE <paramètres> <interface_dimensions >

  L'exemple suivant montre l'utilisation de la déclaration d'interface :

  Interface x.min=0 x.max=2000 y.min=0 y.max=0 s.n=1e3 s.p=1e3

  Les valeurs max et min déterminent les limites, s.n et s.p sont les vitesses de recombinaison superficielle des électrons et des trous aux interfaces.

- **LUMIERE** : la lumière est modélisée dans ATLAS par la déclaration :

  BEAM <parameters>

En voici un exemple :

beam num=1 x.origin =1000 y.origin=-30 angle=90.0 power. file=AM0dis.spec reflects=1 front.refl back.refl

Cette déclaration définit le nombre des faisceaux lumineux qui est 1, l'origine du rayon pour des sources optiques 2D ; le **x.origin** et le **y.origin** sont les coordonnées x et y de l'origine du faisceau lumineux en microns. L'**angle** d'incidence de 90 degrés indique que le rayon est perpendiculaire à la surface éclairée de la cellule solaire. **power.file** spécifie la source spectrale de la lumière en indiquant le nom d'un fichier d'extension **. spec** qui contient les valeurs des intensités du spectre utilisé en fonction de leurs longueurs d'onde.

Le paramètre **reflects=1** donne le nombre de réflexions du faisceau lumineux. La déclaration **front.refl** et **back.refl** permet au rayon lumineux de se réfléchir en face avant et arrière de la cellule.

III.4.3 Sélection de la méthode numérique

Après la précision du modèle de matériaux, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types de techniques sont utilisée dans « Silvaco-Atlas » :

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton
- Méthode des blocks

Pour la méthode de GUMMEL, elle est utilisée pour la résolution des équations a une seule inconnue et des variables fixées constantes, la résolution se faite d'une manière itérative jusqu'à la solution est achevée. La deuxième méthode de NEWTON est la méthode la plus répandu dans le programme Atlas, elle est utilisée pour résoudre des systèmes d'équations à plusieurs inconnues. La troisième méthode est une combinaison des deux méthodes, elle est utiles pour les systèmes d'équation mixtes.

III.4.4 Spécification des solutions

Après avoir sélectionné la méthode numérique il est nécessaire de déterminer les solutions**.** La spécification de solution est donnée par les déclarations : LOG, SOLVE, LOAD, et SAVE, d'après [7,9] :

- **Log :** L'instruction Log est utilisée pour enregistrer toutes les caractéristiques terminales dans un fichier de données. L'exemple suivant montre un exemple d'utilisation de l'instruction LOG.

logoutfile = myoutputfile.log

L'exemple montre l'enregistrement de données dans le fichier (myoutputfile.log).

- **Solve** (Résoudre) : L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Cette déclaration a le format de base suivant :

SOLVE <bias_points>

Par exemple :

solve vanode=0 vstep=0.01 vfinal=2 name=anode

- **Load et Save :** La commande **LOAD (chargement)** introduit, à partir d'un fichier existant, pour chaque point de polarisation les solutions précédentes en tant que proposition initiale. L'instruction **SAVE (sauvegarde)** permet l'enregistrement de toutes les informations obtenues pour un nœud dans un fichier de sortie. Les instructions pour load et save sont comme suit :

LOAD INFILE=<filename>

SAVE OUTFILE =<filename>

III.4.5 Analyse des résultats

Une fois la solution a été trouvée pour un problème de dispositif à semiconducteurs, les informations peuvent être affichées graphiquement. D'après [1] :

- **EXTRACT** : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.
- **TONYPLOT** : démarre le programme « TonyPlot » permettant une représentation graphique des données.

III.5 Les équations de Base de Semi-conducteur en ATLAS-SILVACO

Ce simulateur de dispositifs est basé sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et des équations de continuité pour les électrons et les trous. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique [8].

L'équation de Poisson montre une relation entre le potentiel et la densité des porteurs [4] :

$$\Delta V = -\frac{q}{\varepsilon}[p - n + N_D^+ - N_A^-] \quad \textbf{III. 1}$$

Où V le potentiel, q la charge élémentaire d'électrons, ε la constante diélectrique, $\mathrm{N_D^+}$ et $\mathrm{N_A^-}$ les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisées, et n et p les densités des électrons et des trous.

Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont [4] :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = +\frac{1}{q} div\overrightarrow{J_n} + G_n - R_n \quad \textbf{III. 2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} div\overrightarrow{J_p} + G_p - R_p \quad \textbf{III. 3}$$

Où J_n et J_p sont les densités de courant des électrons et des trous, G_n et G_p les taux de génération pour les électrons et les trous, R_n et R_p les taux de recombinaisons pour les électrons et les trous.

Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle d'entrainement diffusion.

Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le premier correspond à l'entrainement des charges par le champ électrique, le second correspond à la diffusion des porteurs [4].

$$\overrightarrow{J_n} = qn\mu_n\vec{E} + qD_n\overrightarrow{grad(n)} \quad \textbf{III. 4}$$

$$\overrightarrow{J_p} = qp\mu_p\vec{E} - qD_p\overrightarrow{grad(p)} \quad \textbf{III. 5}$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad(V)} \quad \textbf{III. 6}$$

Où D_n et D_p sont les coefficients de diffusion. Ils sont directement reliés aux mobilités des porteurs par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{kT}{q}\mu_n \quad \textbf{III.7}$$

$$D_p = \frac{kT}{q}\mu_p \quad \textbf{III.8}$$

III.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté quelques informations de base en programmation par Silvaco-Atlas, alors plusieurs aspects spécifiques à la méthodologie de programmation ont été présentés comprenant structure de programme, Spécification des paramètres des matériaux et modèles physiques et sélection de la méthode numérique.

Références du chapitre III

[1] DIB Wassila Née KAZI-TANI, « Modélisation Des Structures Photovoltaïques : Aspects Fondamentaux Et Appliques », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKÏD DE TLEMCEN,2011, p77-79,84

[2] Miloudi Wafa, « Simulation d'un Transistor HEMT a base de GaAs (AlGaAs/GaAs) », thème de master, Université Mohamed Khider-Biskra,2014, p31

[3] Athena User's Manual, Silvaco International, 2013.

[4] Atlas User's Manual, Device Simulation Software, 2013.

[5] Mallem Izzeddine, « Simulation Des Cellules Solaires Hétérojonction Si-SiGe Par Silvaco », Thèse De Magister, Université Mohamed Khider-Biskra,2014, P64,65,74,

[6] Imad BENACER, « Modélisation des transistors organiques », Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna,2016, p71,72

[7] ZIANI Zakarya, « Etude des Propriétés Physiques et Optiques des Couches Minces et des Nanomatériaux pour les Matériaux IV-IV. Application aux Cellules Solaires de Troisième Génération », Thèse de Doctorat, Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen, 2013, p114-16

[8] Amar Hichem, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSéléniure de Cuivre Indium Galium $CuIn_{(1-x)}Ga_xSe_2$ (CIGS) », Thèse De Magister, Université Mohamed Khider-Biskra,2014,p43-46

[9] Mancer Mansoura, « Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs) », Thèse De Magister, Université Mohamed Khider-Biskra,2012, p63,64

[10] Kahoul Fouad, « Caractéristique électrique d'une cellule solaire à hétérojonction a-Si: H /µc-Si », thème de master, Université Mohamed Khider-Biskra,2014,p50-53

Résultats et Discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de l'étude par simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire en couches minces et à hétérojonction à base de CIGS et leurs interprétations. En premier lieu, nous allons simuler deux cellules solaires de structures : ZnO/CdS(n)/CIGS(p)/Mo et ZnO/ZnS(n)/CIGS(p)/Mo en utilisant le logiciel Silvaco Atlas-2D. Ensuite nous allons comparer les résultats de la simulation électrique de la cellule en CdS avec ceux trouvés expérimentalement.

En deuxième lieu, nous allons comparer les résultats de la simulation électrique de la cellule en CdS avec la cellule en ZnS. Après cela, nous choisirons la meilleure cellule pour étudier l'effet du dopage et de l'épaisseur des couches tampon /absorbeur sur les paramètres photovoltaïques (J_{cc}, V_{co}, FF, η) de la cellule solaire dans le but d'aboutir à un rendement maximal de la cellule solaire à base du CIGS.

IV.2 Cellule solaire en CdS/CIGS

IV.2.1 Structure de la cellule en CdS/CIGS

Nous avons pris comme référence la structure développée par Philip Jackson et al. [1], la cellule solaire en CIGS à étudier possède une structure p-n à hétérojonctions, la couche tampon en CdS de type (n) et la couche absorbeur en CIGS de type (p) avec deux électrodes l'anode en molybdène (Mo) et la cathode en ZnO. La construction de cette structure dans le simulateur Atlas consiste en quatre étapes : définitions du maillage, des régions, des électrodes et du dopage.

- Première étape : nous avons défini le maillage de la structure, le maillage divise et discrétise la structure à simuler en petites cellules pour permettre la résolution numérique des équations fondamentales des semi-conducteurs (équations de continuité et de Poisson pour les électrons et pour les trous) afin de trouver la distribution des porteurs de charges, du potentiel électrique et du courant. Le maillage doit être le plus fin possible pour l'obtention de bons résultats de simulation.
- Deuxième étape : nous avons défini les régions avec ses matériaux représentant les couches formant la cellule solaire en ZnO/CdS(n)/CIGS(p)/Mo.
- Troisième étape : nous avons défini les régions et les matériaux spécifiés de chaque électrode. La cathode en ZnO est située sur la couche en CdS et l'anode en Mo est réalisée sur toute la surface inférieure de la couche en CIGS de la cellule solaire.

- Quatrième étape : nous avons défini le type de dopage et sa concentration, la couche en CdS de type n et la couche en CIGS de type p sont dopées uniformément avec des concentrations de 3×10^{17} cm^{-3} et 8×10^{16} cm^{-3} respectivement.

La figure IV.1 représente la structure simulée de la cellule solaire en CdS/CIGS.

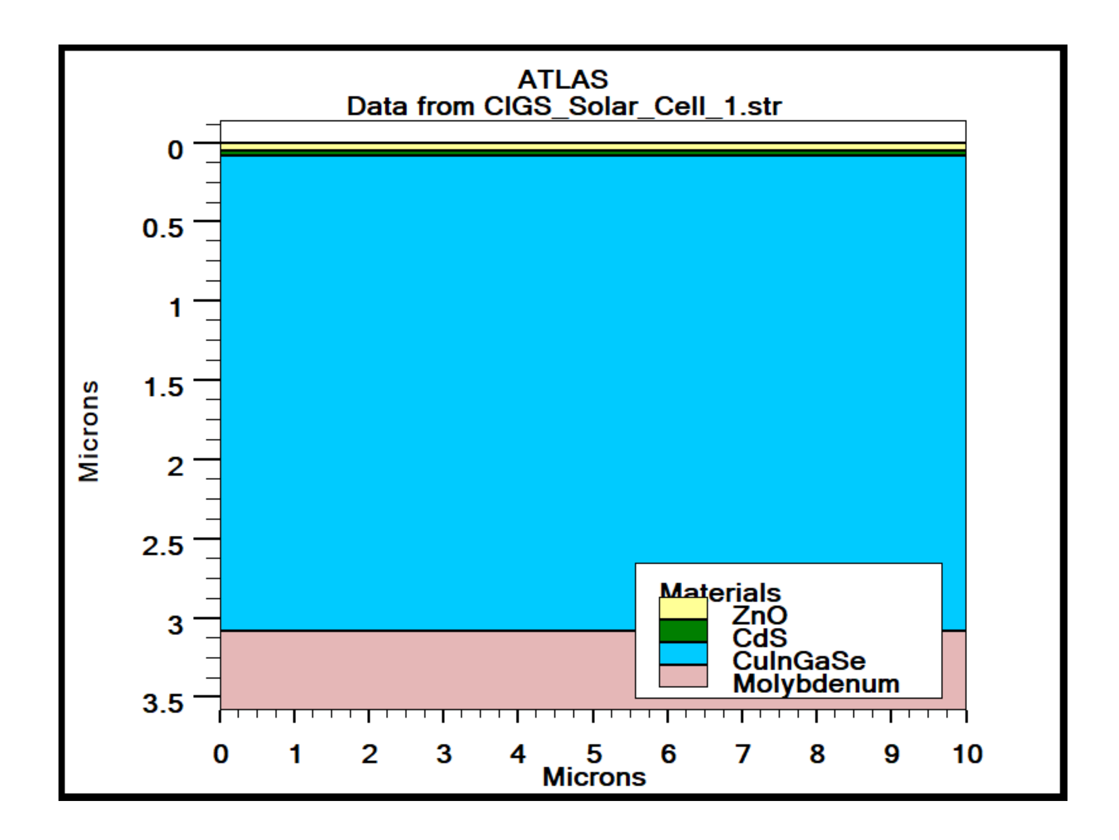


Fig.IV.1 : Structure bidimensionnelle d'une cellule solaire en CdS/CIGS simulée dans Atlas-Silvaco.

IV.2.2 Propriétés des différents matériaux de la cellule solaire

Nous avons utilisé les paramètres optiques et électroniques pour définir les différents matériaux qui composent la cellule solaire.

Les paramètres des matériaux en ZnO, CdS et CIGS utilisés dans la simulation de la cellule solaire sont reportés dans la littérature [1-6] et sont groupés dans le tableau IV.1.

Régions / Paramètres	ZnO	CdS	CIGS
Epaisseur (µm)	0.05	0.03	3
E_g (eV)	3.3	2.42	1.25
N_C (cm^{-3})	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
N_V (cm^{-3})	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
Mobilité des électrons (cm^2/V.s)	100	100	100
Mobilité des trous (cm^2/V.s)	25	25	25
Permittivité relative	9	10	13.6
Affinité électronique (eV)	4.7	4.5	4.8

Tableau IV.1 : Paramètres de simulation la cellule solaire en CIGS.

Les paramètres optiques ; la partie réelle et la partie imaginaire de l'indice de réfraction, n(λ) et k(λ), du CdS et du CIGS se trouvent dans le logiciel Atlas tandis que celles du ZnO sont dans la référence [7].

IV.2.3 Modélisation physique de la cellule solaire dans Atlas

Les modèles que nous avons utilisés dans notre simulation sont décrits dans la documentation d'Atlas et dans la littérature [8-10]. Nous avons considéré le modèle de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) pour les défauts. Le modèle de densité de défauts comprend deux distributions de défauts de formes gaussiennes pour les états donneurs pour ZnO [2], les états accepteurs correspondants au CdS [2] et les états donneurs pour CIGS [11]. Nous avons groupé les valeurs des paramètres de la densité de défauts où $N_{DG,(AG)}$ est la densité des états donneurs (accepteurs) de formes gaussiennes, $E_{A(D)}$ est l'énergie du pic de la gaussienne, W_G la largeur de la distribution et σ la section de capture (tableau IV.2). Le modèle de recombinaison à l'interface CdS/CIGS est aussi pris en considération dans notre simulation ; les vitesses de recombinaison des électrons (trous) $S_n(S_p) = 10^5$ cm/s.

	ZnO	CdS	CIGS
N_{DG}, N_{AG} (cm^{-3})	D :10^{17}	A :10^{15}	D :10^{15}
E_A, E_D (eV)	Milieu du gap	Milieu du gap	Milieu du gap
W_G (eV)	0.1	0.1	0.1
σ_n(cm^2)	10^{-12}	10^{-17}	2×10^{-16}
σ_p(cm^2)	10^{-15}	10^{-13}	2×10^{-15}

Tableau IV.2 : Paramètres de la densité de défauts des matériaux en ZnO, CdS et CIGS [2-4].

Après la détermination des modèles physiques vient l'étape de la définition de la méthode numérique de résolution et le calcul des paramètres de la cellule solaire. Nous avons choisi la méthode de Newton pour la résolution des équations de transport des semi-conducteurs liant le potentiel électrostatique et les densités de porteurs de charges ensemble. A chaque itération, le système des équations est résolu ensemble. La simulation électrique de la cellule solaire démarre par une polarisation nulle sur toutes les électrodes (état de l'équilibre thermodynamique). Une fois la solution de l'état de l'équilibre thermodynamique est trouvée, elle est utilisée pour l'initialisation de la simulation à l'état éclairée et polarisé. Les solutions

obtenues sont tracées soit par une interface graphique (TONYPLOT) d'Atlas ou par extraction des résultats.

IV.3 Résultats de simulation de la cellule solaire en CdS/CIGS

- **Cellule solaire en CdS/CIGS réalisée expérimentalement**

La cellule solaire en CIGS réalisée expérimentalement comporte sept couches minces. A l'arrière de la jonction, le substrat en verre (3 mm) et le molybdène (0.5-0.9 µm) forme le contact ohmique arrière recueillant les trous. La troisième est la couche de CIGS (appelée absorbeur 2.5–3.0 µm). La quatrième, appelée couche tampon, est une fine couche (30–50 nm) déposée à la surface du CIGS, et constituée de sulfure de cadmium CdS (de type n. La cinquième couche et la sixième couche sont à base de ZnO intrinsèque (50–100 nm) et ZnO dopé Al (150 - 200 nm) d'elle se situe à l'interface avec les couches suivantes à base de ZnO, puis de). La dernière couche en MgF_2 sert comme une couche anti réfléchissante de la lumière [1]. La figure IV.2(a) montre une coupe transversale et une coupe vue en microscopie électronique à balayage.

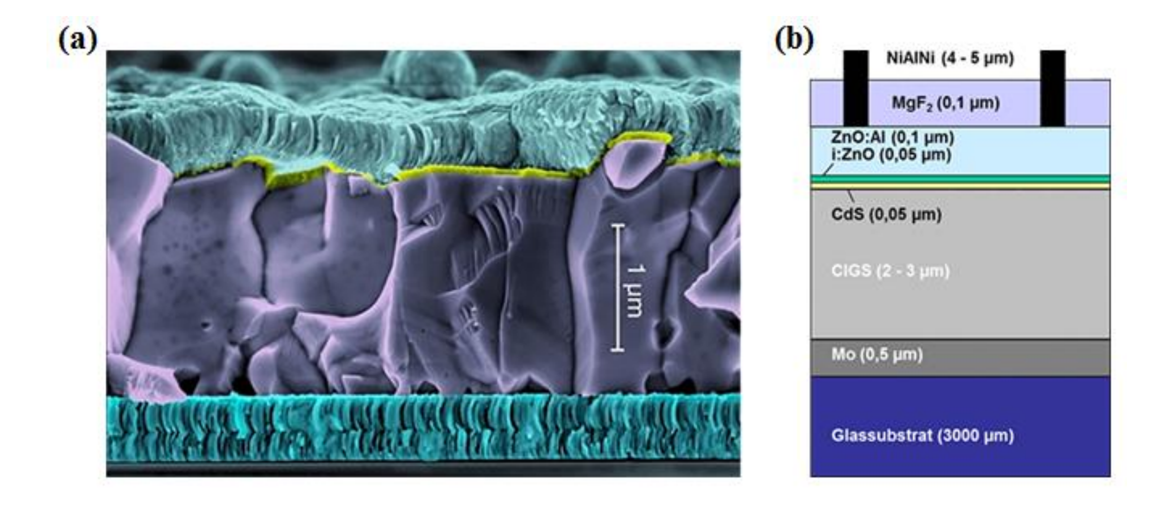


Fig.IV.2 : Structure en coupe d'une cellule CIGS, (a) Image au microscope à Balayage, (b) schéma [12].

La figure IV.3 représente les caractéristiques I(V) et P(V) expérimentales d'une cellule solaire en CIGS avec une surface de 0.5 cm^2.

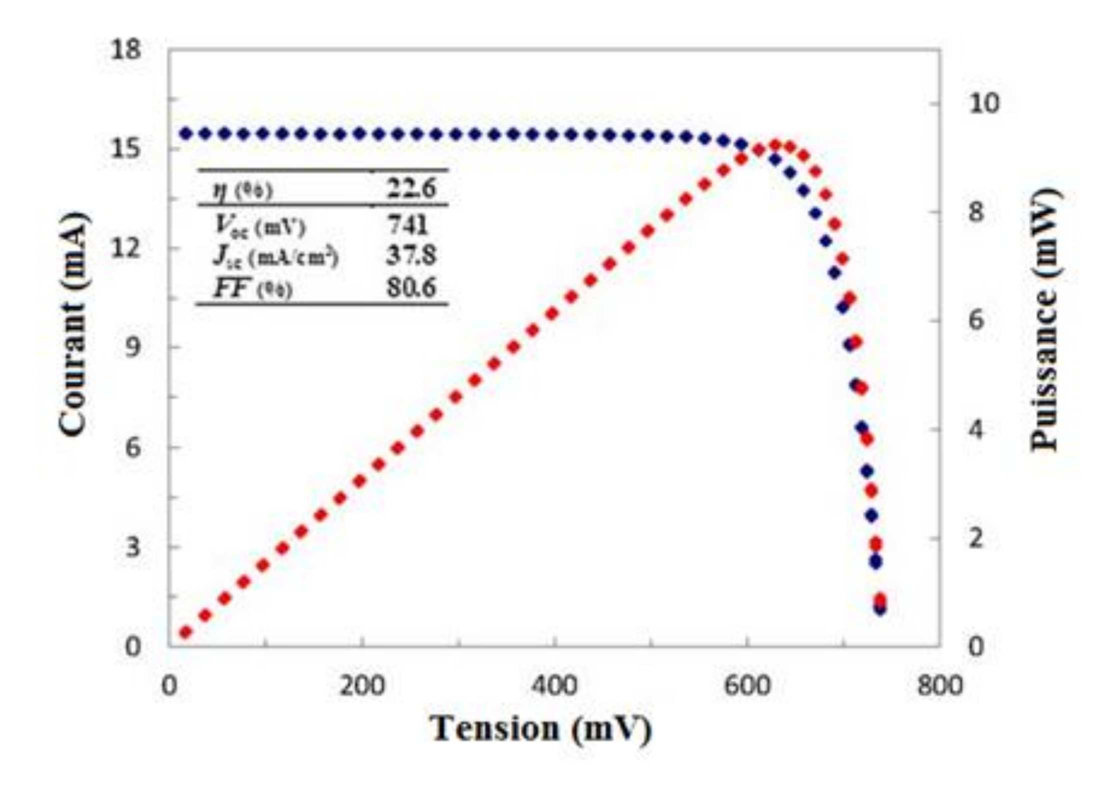


Fig.IV.3 : Caractéristiques I(V) et P(V) expérimentales d'une cellule solaire en CIGS [1].

Simulation de la cellule solaire en CdS/CIGS

Après simulation de la cellule solaire en CdS/CIGS avec les paramètres précédents et une surface de 0.5 cm^2 en considérant le spectre solaire AM 1.5 de densité de puissance 100 mW/cm^2, nous avons obtenu les résultats représentés sur la figure IV.4.

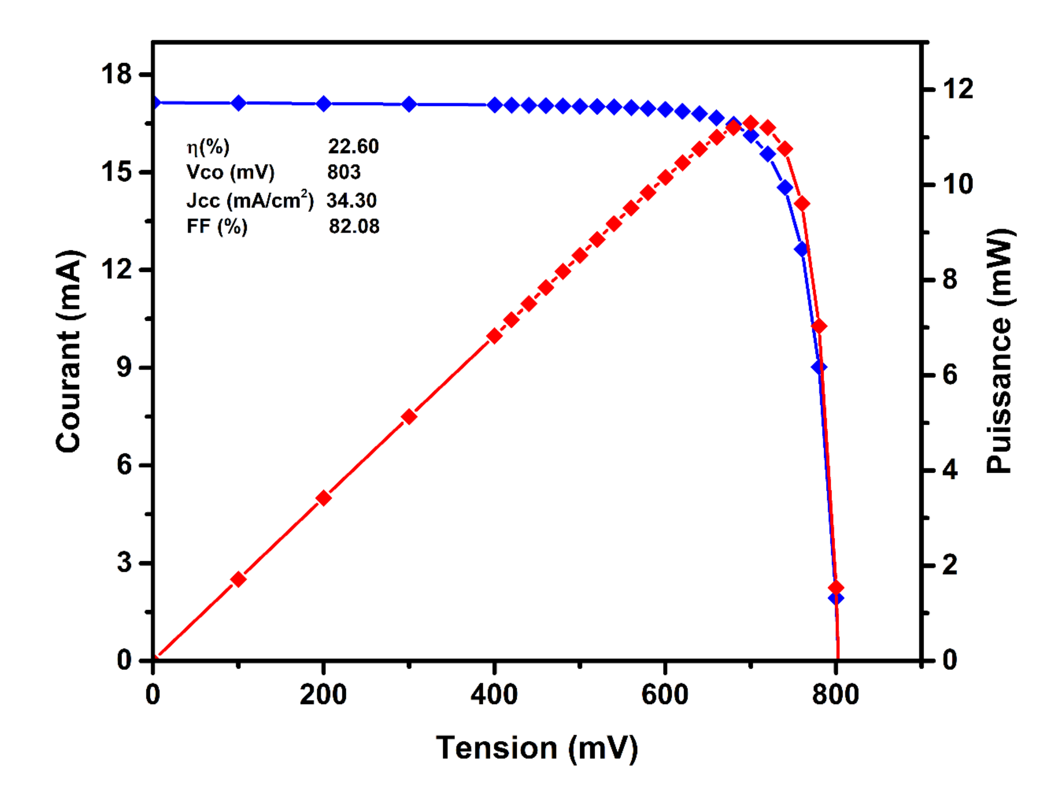


Fig.IV.4 : Caractéristiques I(V) et P(V) simulées d'une cellule solaire en CIGS.

Le tableau IV.3 résume les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en CdS/CIGS simulés et ceux obtenus expérimentalement.

	$J_{cc}(\mathrm{mA.cm^{-2}})$	$V_{co}(\mathrm{mV})$	FF (%)	$\eta(\%)$
Cellule réalisée expérimentalement	37.8	741	80.6	22.6
Cellule simulé	34.3	803	82.08	22.6

Tableau IV.3 : Comparaison entre les paramètres photovoltaïques simulés et obtenus expérimentalement des cellules solaires en CdS/ CIGS.

On remarque que les résultats que nous avons obtenus par simulation sont en accord avec ceux trouvés expérimentalement.

La cellule solaire en CdS/CIGS cause des problèmes dans l'environnement et la santé due à la toxicité du matériau en cadmium (Cd) contenu dans le sulfure de cadmium (CdS). On trouve

que les matériaux de sulfure de zinc (ZnS) sont les mieux convenables pour remplacer le sulfure de cadmium (CdS) [6,13-16]. Ils sont dépourvu d'éléments toxiques et que la bande interdite du ZnS (3,68 eV) est supérieur à celle de CdS (2,42 eV), ce qui permet la transmission de photons à énergie supérieure à la couche absorbante en CIGS. C'est un matériau qui existe en abondance dans la nature et à faible cout, pour cela nous avons remplacé le matériau CdS par le matériau ZnS dans la suite de notre travail.

IV.4 Résultats de simulation de Cellule solaire en ZnS/CIGS

Nous avons pris une cellule solaire en ZnS/CIGS ayant la même structure que celle de la cellule solaire en CdS/CIGS décrite dans le paragraphe précédent (sous-titre IV.2.1), la couche en CdS a été substituée par la couche en ZnS.

La figure IV.5 représente la structure simulée de la cellule solaire en ZnS/CIGS.

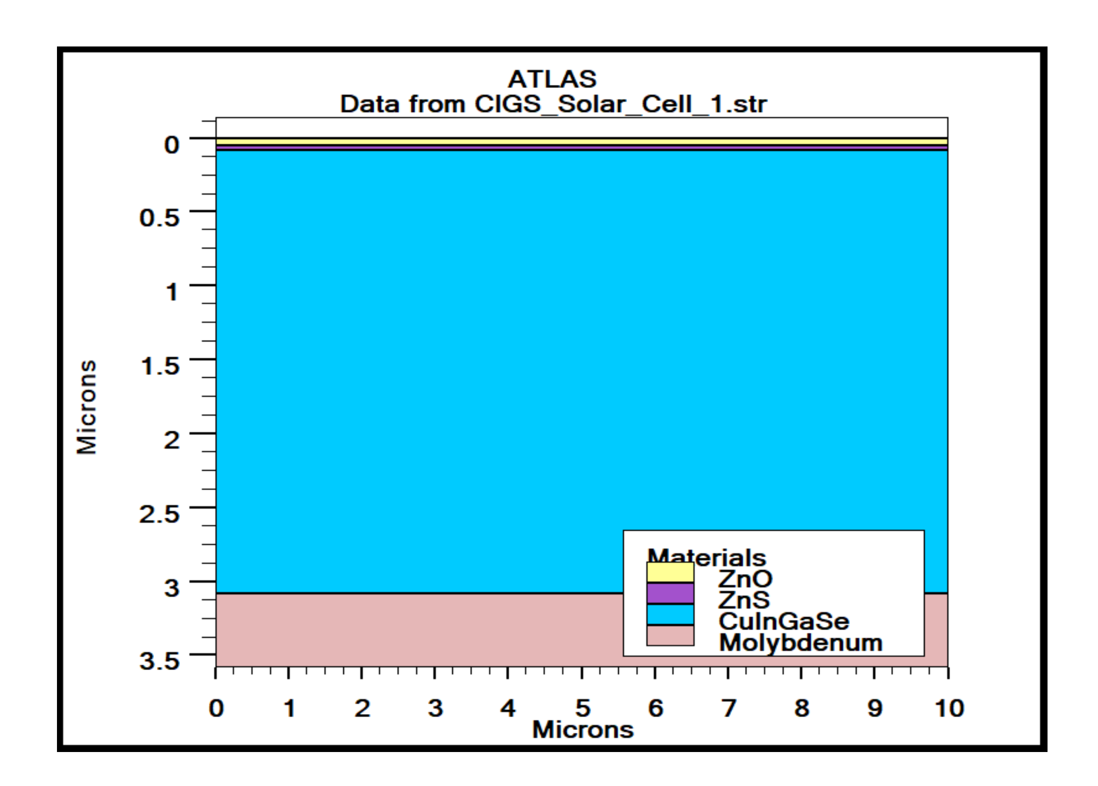


Fig.IV.5 : Structure bidimensionnelle d'une cellule solaire en ZnS/CIGS.

Les paramètres des matériaux ZnO, CdS, ZnS et CIGS utilisés dans la simulation de la cellule solaire sont reportés dans la littérature [1-6,17] et sont groupés dans le tableau IV.4.

Régions / Paramètres	ZnO	CdS	ZnS	CIGS
Epaisseur (µm)	0.05	0.03	0.03	3
E_g (eV)	3.3	2.42	3.68	1.25
N_C (cm^{-3})	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	1.5×10^{18}	2.2×10^{18}
N_V (cm^{-3})	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
Mobilité des électrons (cm^2/V.s)	100	100	250	100
Mobilité des trous (cm^2/V.s)	25	25	40	25
Permittivité relative	9	10	8.32	13.6
Affinité électronique (eV)	4.7	4.5	4.5	4.8

Tableau IV.4 : Paramètres de simulation la cellule solaire en CIGS.

La cellule solaire en ZnS/CIGS sous éclairement par le spectre solaire AM 1.5 et de densité de puissance 100 mW/cm^2 et une surface de 0.5 cm^2 que nous avons simulé donne comme résultat : La densité du courant de court-circuit $J_{cc} = 35.66\ \mathrm{mA/cm^2}$, la tension en circuit ouvert $V_{co} = 804\ \mathrm{mV}$, le facteur de forme $FF = 82.14\ \%$ et le rendement de conversion $\eta = 23.54\ \%$.

La figure IV.6 représente les caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire en ZnS/CIGS.

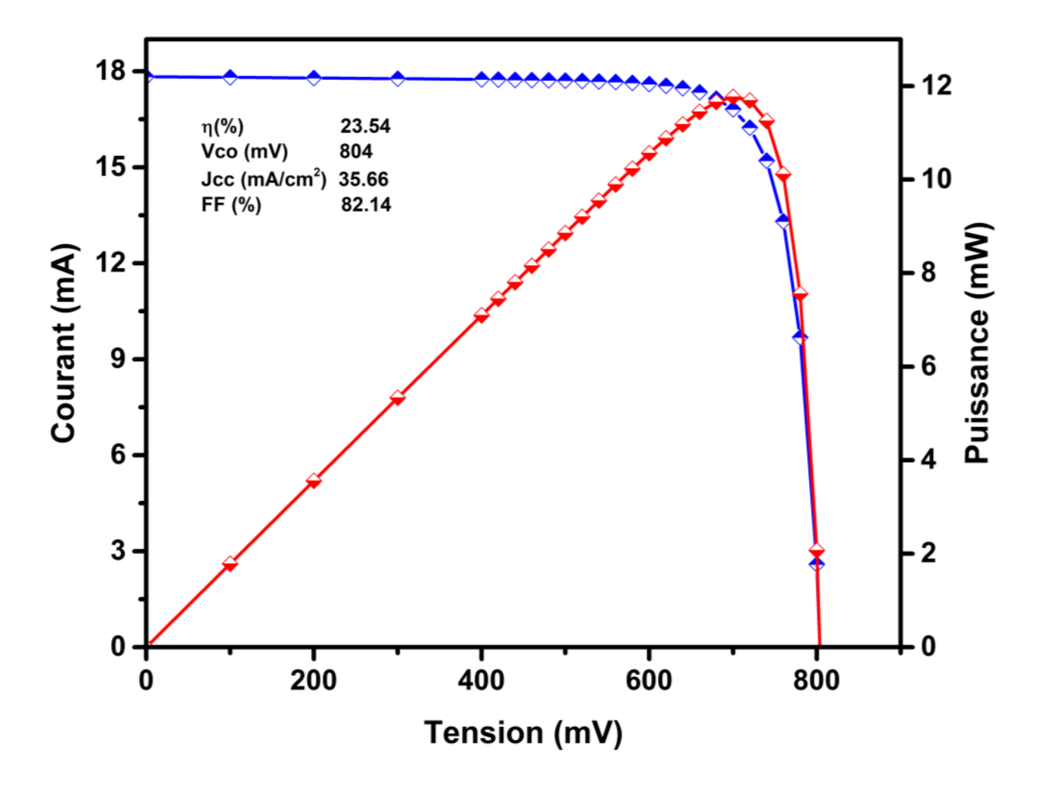


Fig.IV.6 : Caractéristiques I(V) et P(V) de simulation d'une cellule solaire en ZnS/CIGS.

IV.5 Comparaison entre deux cellules en CdS/CIGS et ZnS/CIGS

La figure IV.7 représente les caractéristiques J-V de deux cellules solaires en CIGS avec des couches tampon en CdS et en ZnS.

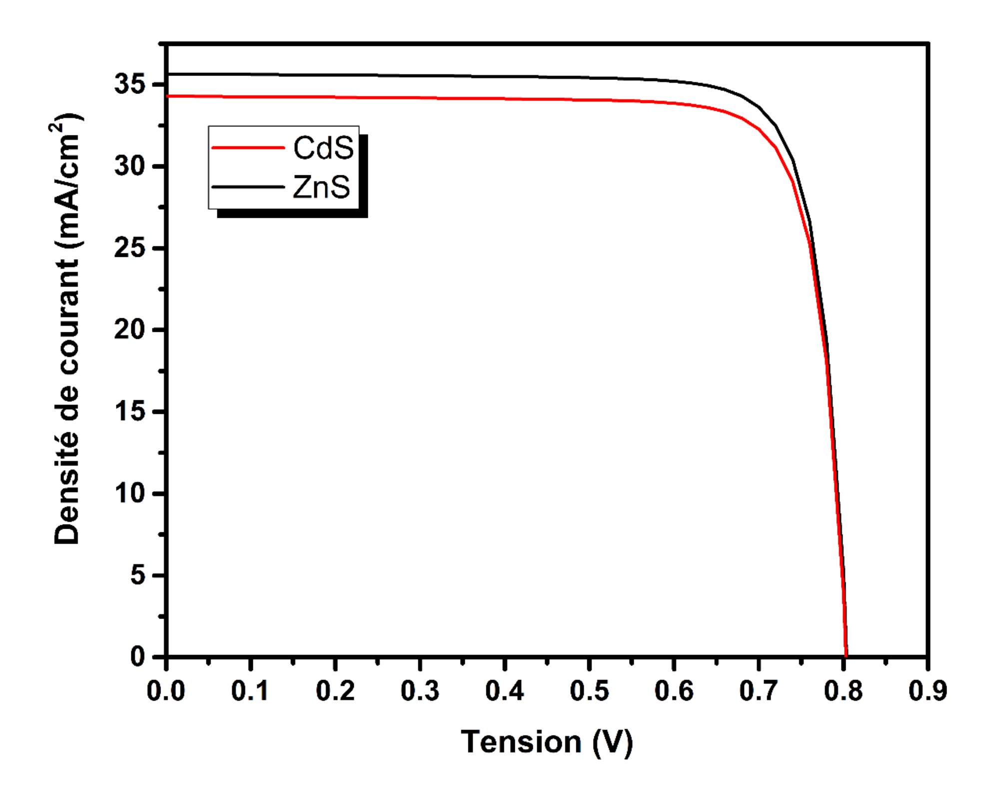


Fig.IV.7 : Courbe J-V de cellules en CdS/CIGS et en ZnS/CIGS.

On remarque que la densité de courant de court-circuit (J_{cc}) de la cellule en ZnS est supérieure à celle de la cellule en CdS parce que l'absorption de la lumière pour les courtes longueurs d'ondes par le matériau CdS est supérieur à celle du matériau ZnS ($E_g^{ZnS} > E_g^{CdS}$). Par contre la tension en circuit ouvert (V_{co}) de la cellule en CdS est presque la même que celle de la cellule en ZnS (Tableau IV.5).

	J_{cc} (mA. cm^{-2})	V_{co} (V)	FF (%)	η (%)
Cellule en CdS	34.30	0.803	82.08	22.60
Cellule en ZnS	35.66	0.804	82.14	23.54

Tableau IV.5 : Comparaison entre les cellules en CdS et en ZnS.

La comparaison entre les deux cellules solaires en CdS et en ZnS indique que la cellule solaire en ZnS a de meilleure performance que celle en CdS.

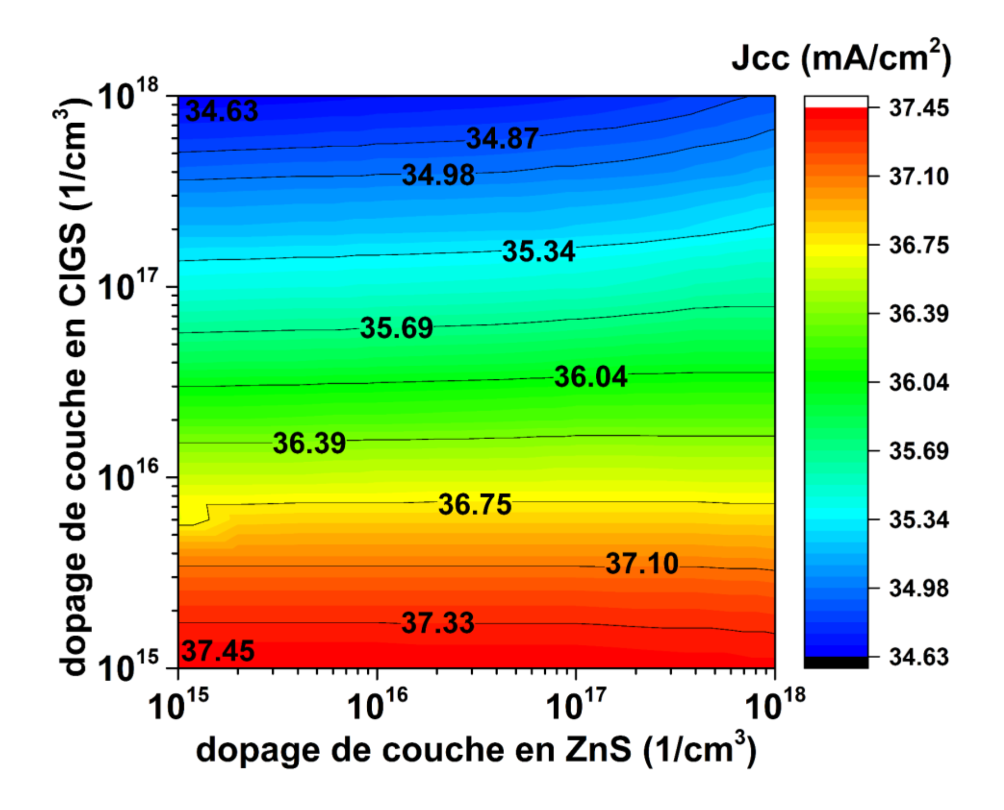
Dans la suite nous allons étudier l'effet du dopage et de l'épaisseur des couches en ZnS et CIGS sur les paramètres de la cellule solaire en CIGS dans le but d'optimiser notre cellule solaire ZnS/CIGS.

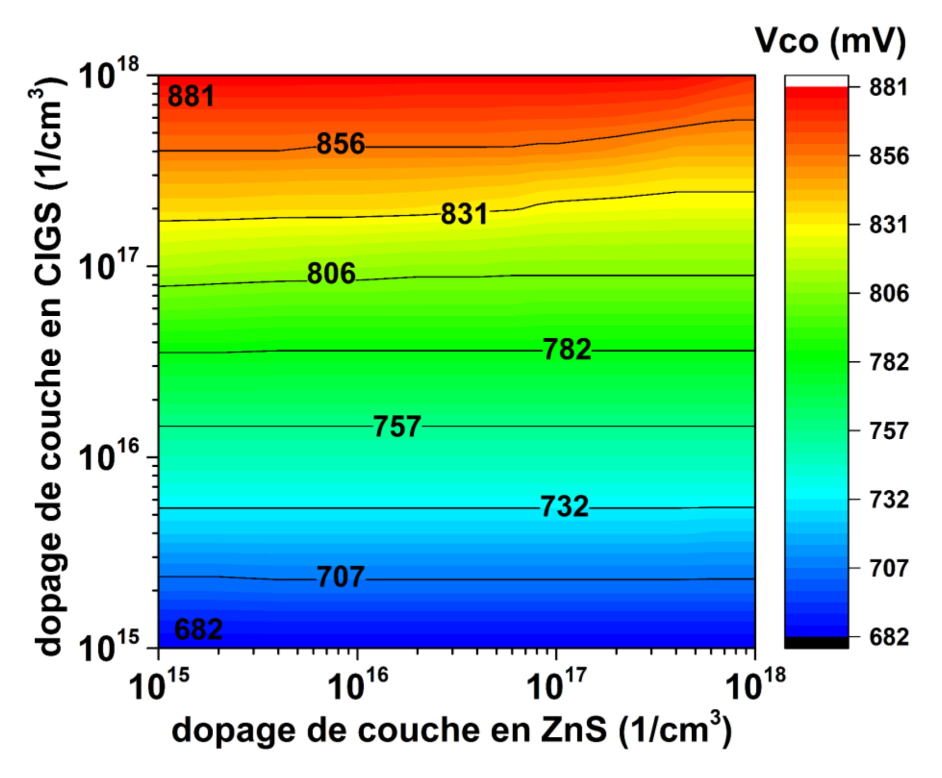
IV.5 Effets des couches en ZnS et CIGS sur les performances de la cellule solaire

IV.5.1 Effet du dopage des couches en ZnS et CIGS

Pour une couche en ZnS (30 nm) et CIGS (3 μm), nous avons calculé les paramètres de la cellule solaire pour différentes valeurs de la concentration du dopage N_d du ZnS entre 10^{15} cm^{-3} et 1×10^{18} cm^{-3} et avec différentes valeurs de la concentration du dopage N_a du CIGS de 10^{15} cm^{-3} à 1×10^{18} cm^{-3}. Les résultats sont illustrés dans la figure IV.8.

Nous remarquons sur la figure IV.8, que lorsque le dopage de la couche absorbeur en CIGS (N_a) augmente de 10^{15} à 10^{18} cm^{-3}, il y'a un décroissement de la densité du courant de court-circuit (J_{cc}) de 37.45 à 34.63 mA/cm^2 par contre il y a un faible effet des variations du dopage (N_d) de la couche tampon en ZnS. Par contre la tension de circuit ouvert (V_{co}) augmente de 682 à 882 mV quand le dopage (N_a) de la couche absorbeur en CIGS augmente de 10^{15} à 10^{18} cm^{-3} alors que l'effet du dopage (N_d) de la couche tampon en ZnS est faible.


Jcc (mA/cm2)
37.45
37.10
36.75
36.39
36.04
35.69
35.34
34.98
34.63
34.63
34.87
34.98
35.34
35.69
36.04
36.39
36.75
37.10
37.33
37.45
dopage de couche en CIGS (1/cm3)
dopage de couche en ZnS (1/cm3)
10^15
10^16
10^17
10^18


Vco (mV)
881
856
831
806
782
757
732
707
682
881
856
831
806
782
757
732
707
682
dopage de couche en CIGS (1/cm3)
dopage de couche en ZnS (1/cm3)
10^15
10^16
10^17
10^18

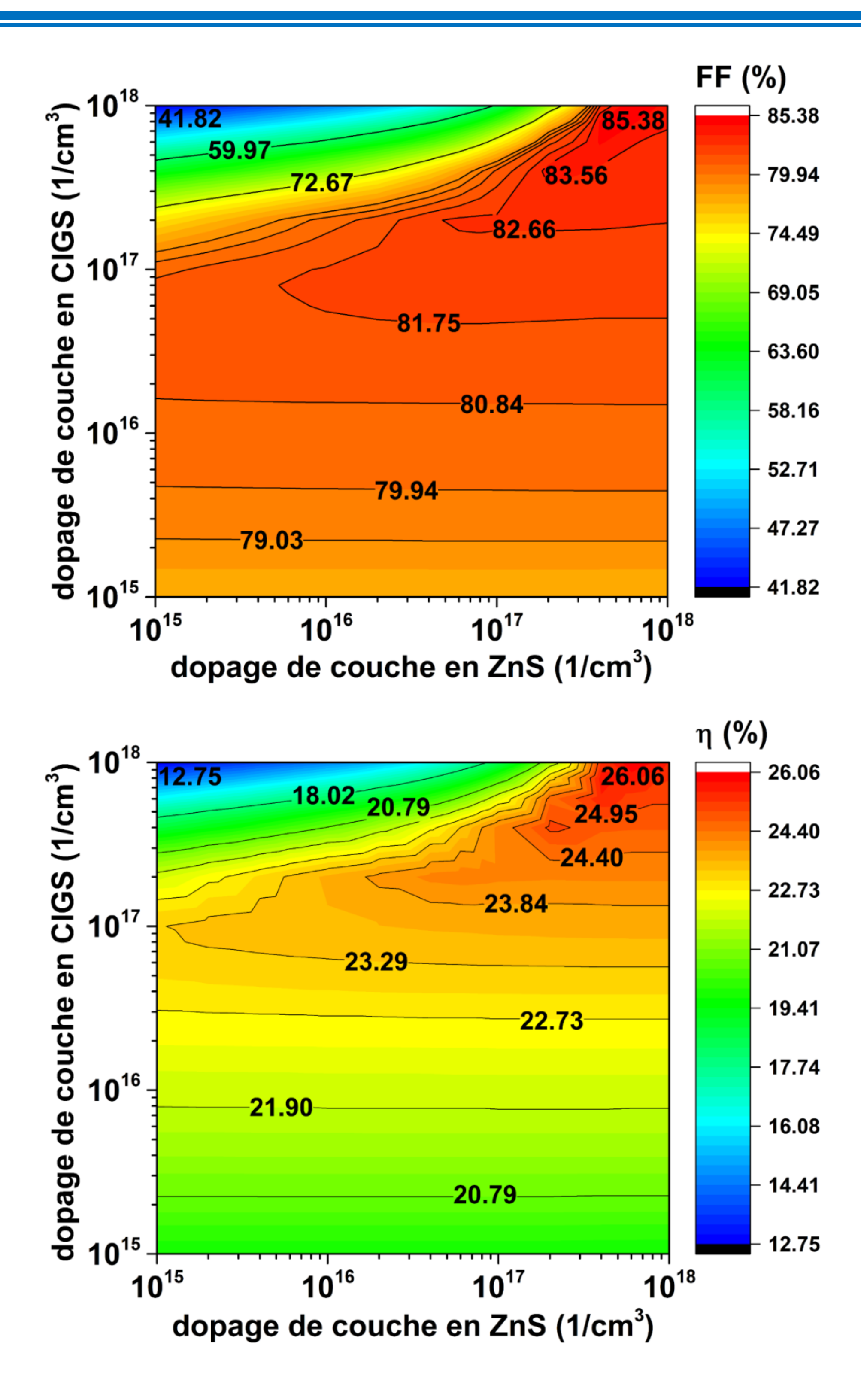


Fig.IV.8 : L'effet du dopage des couches en ZnS et CIGS sur les paramètres (J_{cc}, V_{co}, FF, η) de la cellule solaire.

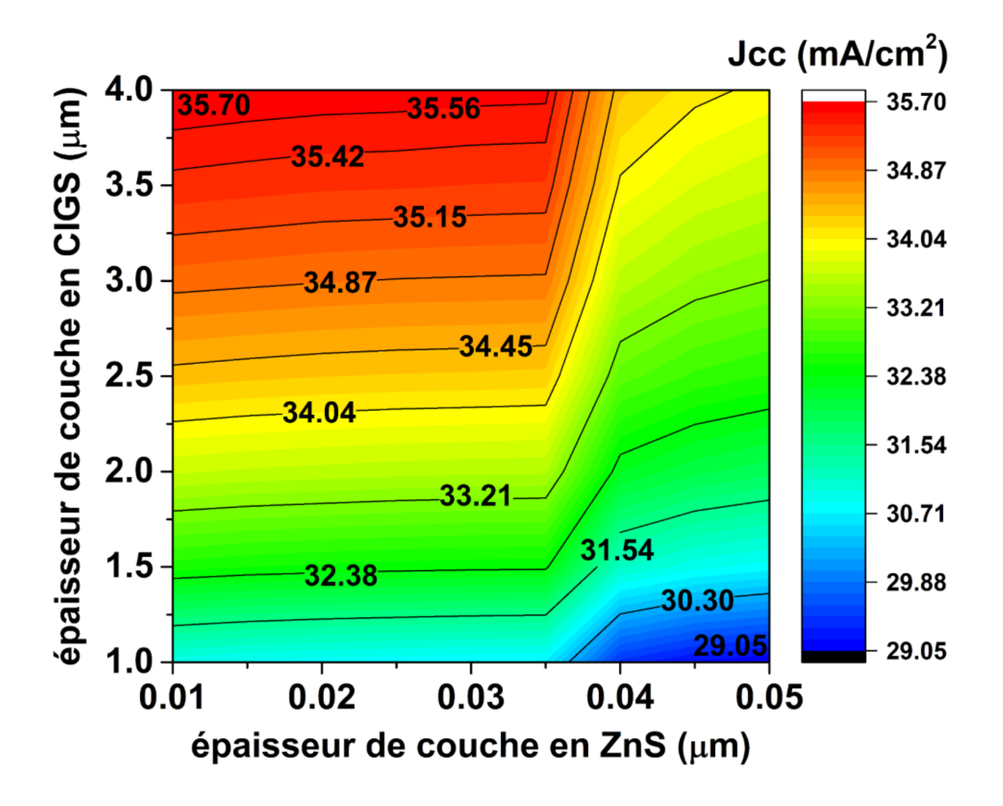
Nous remarquons aussi une augmentation rapide du rendement (η) pour un dopage entre 2×10^{17} et 10^{18} cm^{-3} des deux couches absorbeur en CIGS et tampon en ZnS causé par l'accroissement du champ électrique avec le dopage dans l'hétérojonction ZnS/CIGS. Ceci permet une diminution de la recombinaison des photoporteurs dans la zone de charge d'espace, d'où une amélioration de la collecte des porteurs photogénérés et donc une augmentation du rendement de conversion. L'accroissement du rendement est principalement dû à l'augmentation de la tension en circuit ouvert et du facteur de forme (*FF*).

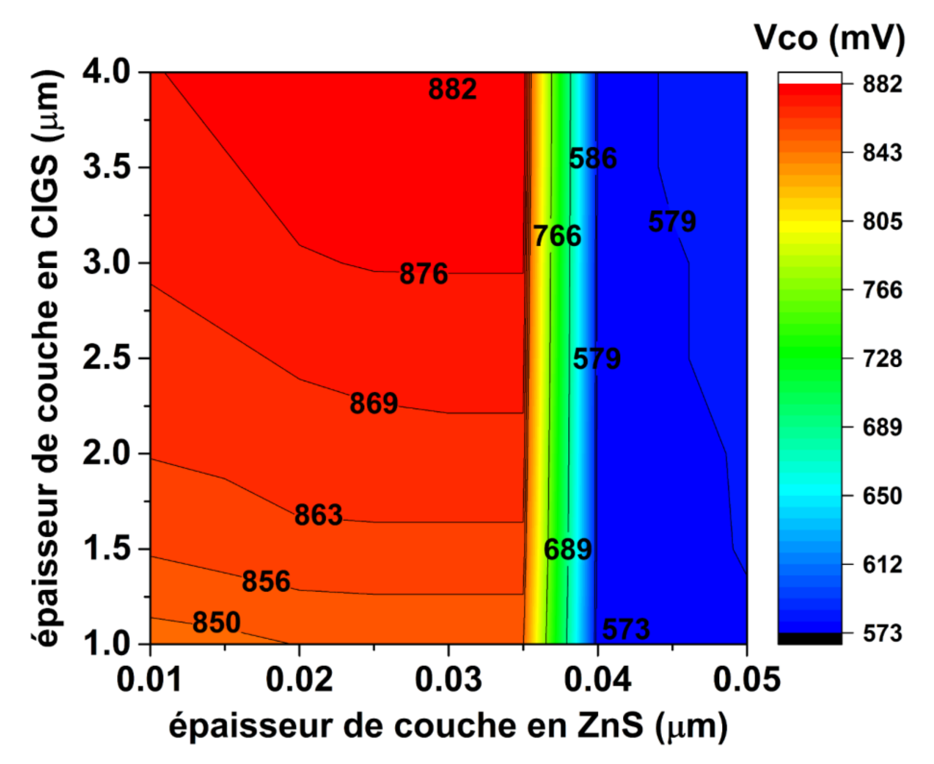
Le rendement le plus élevé est de 26.06% obtenue pour une concentration de 6×10^{17} cm^{-3} de la couche en ZnS et une concentration du dopage de 1×10^{18} cm^{-3} de la couche en CIGS. Nous allons utiliser ces deux valeurs pour étudier l'effet de l'épaisseur des couches en ZnS et en CIGS sur les paramètres de la cellule solaire.

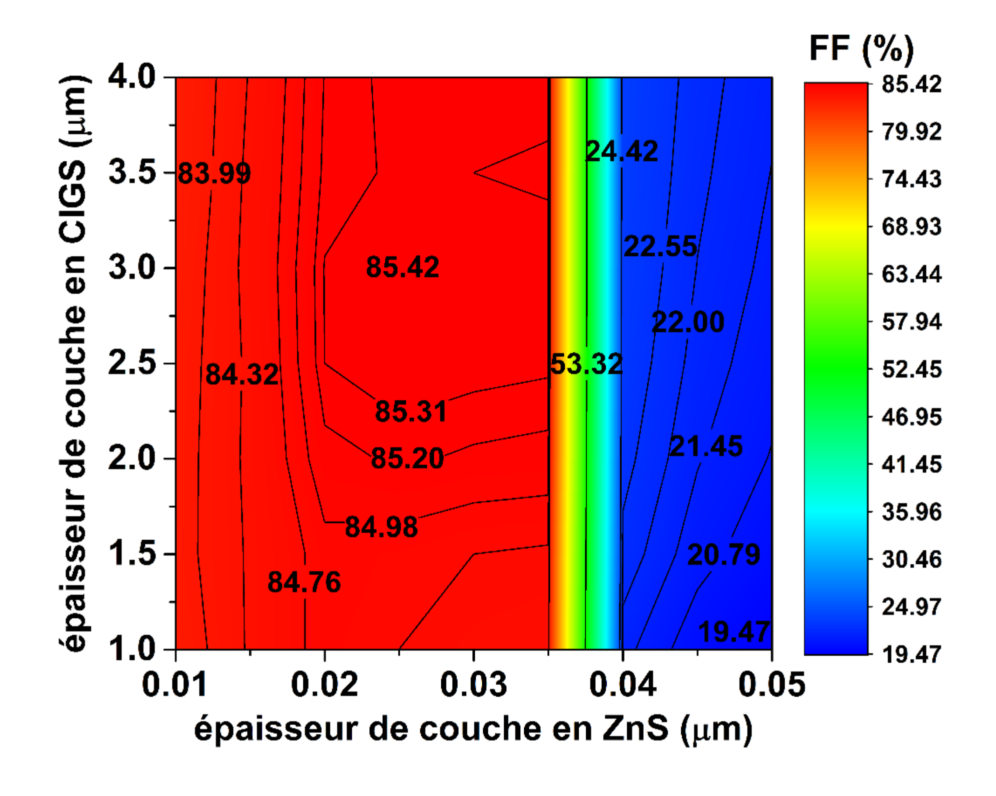
IV.5.2 Effet de l'épaisseur des couches en ZnS et CIGS

L'épaisseur de la couche en ZnS est variée de 10 nm à 50 nm tandis que l'épaisseur de la couche en CIGS est variée de 1 µm à 4 µm. L'effet de l'épaisseur des couches en ZnS et CIGS sur la cellule solaire est illustré dans la figure IV.9.

Nous observons une augmentation de la densité da courant de court-circuit de 30.69 à 35.70 mA/cm^2 avec l'accroissement de l'épaisseur de la couche absorbeur en CIGS de 1 à 4 µm et pour les épaisseurs de la couche tampon en ZnS entre 10 et 35 nm.


Jcc (mA/cm2)
épaisseur de couche en CIGS (µm)
épaisseur de couche en ZnS (µm)
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
35.70
35.56
35.42
35.15
34.87
34.45
34.04
33.21
32.38
31.54
30.30
29.05
35.70
34.87
34.04
33.21
32.38
31.54
30.71
29.88
29.05


Vco (mV)
épaisseur de couche en CIGS (µm)
épaisseur de couche en ZnS (µm)
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
882
586
766
579
876
579
869
863
689
856
850
573
882
843
805
766
728
689
650
612
573



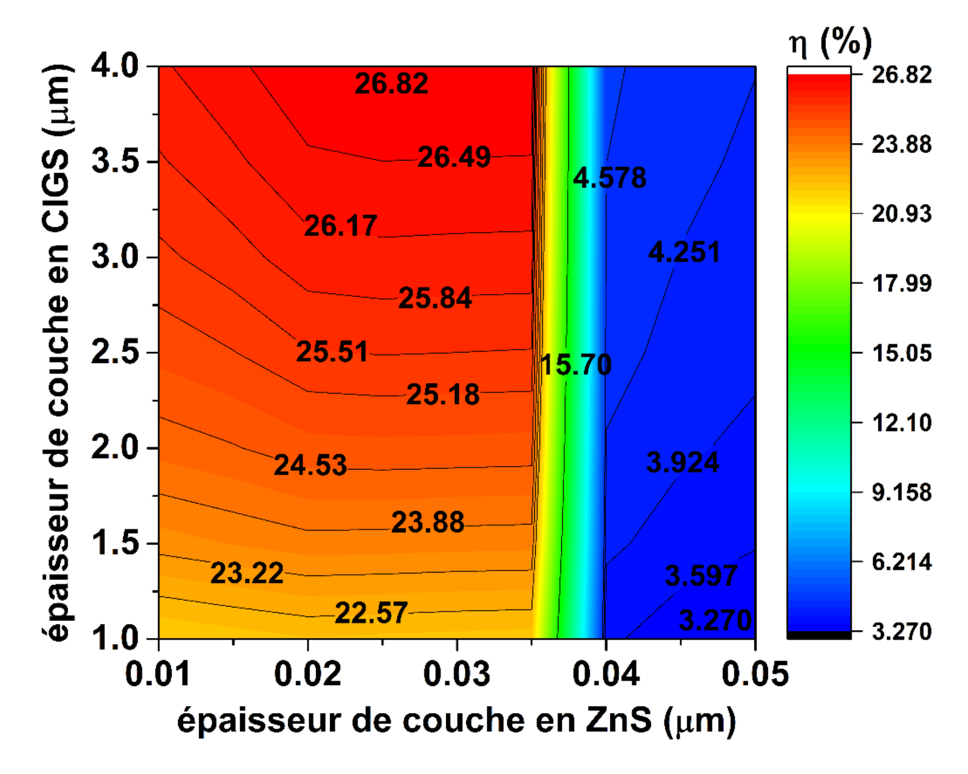


Fig.IV.9 : L'effet de l'épaisseur des couches en ZnS et CIGS sur les paramètres $(J_{cc}, V_{co}, FF, \eta)$ de la cellule solaire.

Nous remarquons aussi, que la tension en circuit ouvert V_{co} augmente vers une valeur maximale $V_{co} = 0.882$ V avec l'épaisseur de la couche tampon en ZnS de 0.03 µm et avec l'épaisseur de la couche absorbeur en CIGS de 4 µm.

L'accroissement de V_{co} et I_{cc} engendrent une augmentation du rendement de conversion de la cellule solaire. Une couche absorbante très mince signifie physiquement que le contact en arrière et la région de déplétion sont très proches, ce qui favorise la capture d'électrons par ce contact. Cette forme de processus de recombinaison est préjudiciable aux performances de la cellule car il affecte V_{co}, J_{cc} et le rendement de conversion.

La variation de l'épaisseur de la couche tampon entre 35 et 50 nm montre qu'il y a une diminution de tous les paramètres de la cellule $(J_{cc}, V_{co}, FF, \eta)$ avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche ZnS. Le rendement maximal obtenu est 26.82 % avec une épaisseur de 25 nm de la couche tampon en ZnS et 4 µm de la couche absorbeur en CIGS.

IV.6 Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté et discuté les résultats d'étude par simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire en couches minces et à hétérojonction à base de CIGS, ces résultats sont générés par le logiciel de simulation Silvaco Atlas-2D.

On a comparé les résultats de la simulation électrique de la cellule en CdS avec ceux trouvés expérimentalement, ces résultats sont en accord avec ceux trouvés expérimentalement. En deuxième lieu, nous avons comparé les résultats de la simulation électrique de la cellule en CdS avec la cellule en ZnS, cette comparaison prouve que la cellule en ZnS est meilleure par rapport à la cellule en CdS. Ensuite nous avons étudié l'impact de deux couches en ZnS (couche tampon) et en CIGS (couche absorbeur) dans le but de concevoir une structure optimale à hétérojonction ZnO/ZnS/CIGS qui donne le meilleur rendement électrique.

Nous concluons de cette étude que le meilleur dopage de la couche en ZnS est de concentration 6×10^{17} cm^{-3} avec une épaisseur mince de 25 nm et le meilleur dopage pour la couche en CIGS de concentration 1×10^{18} cm^{-3} avec une épaisseur de 4 µm pour obtenir le rendement électrique optimal de 26.82%.

Références du chapitre IV

[1] Philip Jackson et al., "Effects of heavy alkali elements in $Cu(In,Ga)Se_2$ solar cells with efficiencies up to 22.6%" , ZSW, Germany, 2016.

[2] M. Gloeckler, A.L. Fahrenbruch, and J.R. Sites, "NUMERICAL MODELING OF CIGS AND CdTe SOLAR CELLS: SETTING THE BASELINE", 3rd World Conference on Photovolraic Enerby Conversion, Japan, 2003

[3] M. Elbar, S. Tobbeche, "Numerical simulation of CGS/CIGS single and tandem thin-film solar cells using the Silvaco-Atlas software", J. Energy Procedia, 2015

[4] M. Elbar, S. Tobbeche, A. Merazga, "Effect of top-cell CGS thickness on the performance of CGS/CIGS tandem solar cell",J. Solar Energy,2015

[5] Md. Asaduzzaman, A.N. Bahar, M.MR. Bhuiyan, "Dataset demonstrating the modeling of a high performance Cu(In,Ga)Se2 absorber based thin film photovoltaic cell", J. Data in Brief,2017

[6] Md. Asaduzzaman, Md. Billal Hosen, Md. Karamot Ali, et Ali Newaz Bahar, "Non-Toxic Buffer Layers in Flexible $Cu(In,Ga)Se_2$ Photovoltaic Cell Applications with Optimized Absorber Thickness", Hindawi ,International Journal of Photoenergy, 2017.

[7] M. Richter, C. Schubbert, P. Eraerds, I. Riedel, J. Keller, J. Parisi, T. Dalibor, A. Avellán-Hampe, "Optical characterization and modeling of $Cu(In,Ga)(Se,S)_2$ solar cells with spectroscopic ellipsometry and coherent numerical simulation", Thin Solid Films, vol.535,p 331–335, (2013)

[8] A. Bouloufa, K. Djessas, A. Zegadi, "Numerical simulation of $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ solar cells by AMPS-1D", Thin Solid Films, vol. 515, pp. 6285-6287, 2007

[9] M. Mezghache, B. Hadjoudja, "Improved performance in bilayer-CIGS solar cell", IEEE, 2013.

[10] Atlas User's Manual, Device Simulation Software, 2013.

[11] S. H. Song, K. Nagaich, E. S. Aydil, R. Feist, R. Haley, and S. A. Campbell, "Structure optimization for a high efficiency CIGS solar cell", IEEE, 2010

[12] disponible en ligne : https://www.zsw-bw.de/en/research/photovoltaics/topics/thin-film-solar-cells-and-modules.html#c460

[13] W. Song, Bo-Ra Koo, S. E. Choi, Yong-Taeg Oh, Dong-Chan Shin, "Optical and Structural Properties of a ZnS Buffer Layer Fabricated with Deposition Temperature of RF Magnetron Sputtering System", World Academy of Science Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol:6, No:12, 2012.

[14] Hadibah Ramli, Sharul Kamal Abdul Rahim, Tharek Abd Rahman, Muhammad Muhaimin Aminuddin, "A Numerical Simulation On Zinc Sulfide (ZnS) Buffer Layer in CuInS2 Based Thin Film Solar Cell", Chalcogenide Letters Vol. 10, No. 9, 2013, p. 341 – 348.

[15] M. Mostefaoui, H. Mazari, S.Khelifi, A.Bouraiou, R.Dabou, "Simulation of High Efficiency CIGS solar cells with SCAPS-1D software", Journal of Energy Procedia, 2015, p 736 – 744.

[16] Rui-Wei You, Yen-Pei Fu, "Zinc Sulfide Buffer Layer for CIGS Solar Cells Prepared by Chemical Bath Deposition", Advances in Technology Innovation, vol. 2, no. 3, 2016, p. 95 - 98

[17] F. Haque, N.A. Khan, K.S. Rahman, M.A. Islam, M. M. Alam, K. Sopian and N. Amin, "Prospects of Zinc Sulphide as an Alternative Buffer Layer for CZTS Solar Cells from Numerical Analysis", 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering, Dhaka, Bangladesh, 2014, p505.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire a hétérojonction, ZnO/CdS/CIGS et ZnO/ZnS/CIGS, de structure (n-p). Ou la couche ZnO de type-n est utilisée comme une couche fenêtre, la couche CdS et ZnS de type-n comme une couche tampon et la couche CIGS de type-p est la couche de l'absorbeur, nous avons utilisé la simulation numérique par le logiciel Silvaco Atlas-2D, pour l'étude des caractéristiques de ces dispositifs. Nous avons aussi optimisé les paramètres de couches de la structure tels que l'épaisseur et la concentration du dopage pour obtenir un rendement de conversion électrique maximal.

En première lieu, nous avons trouvé les résultats de simulation de la cellule solaire en ZnO/CdS/CIGS : La densité du courant de court-circuit $J_{cc} = 34.30\ mA/cm^2$, la tension en circuit ouvert $V_{co} = 0.803$ V, le facteur de forme $FF = 82.08\ \%$ et le rendement de conversion $\eta = 22.60\ \%$. Ces valeurs sont en accord avec celles trouvées expérimentalement.

En deuxième lieu, nous avons comparé les résultats de simulation de la cellule solaire en ZnO/CdS/CIGS avec les résultats de la cellule solaire en ZnO/ZnS/CIGS, les résultats de cette dernière sont les suivants : La densité du courant de court-circuit $J_{cc} = 35.66\ mA/cm^2$, la tension en circuit ouvert $V_{co} = 0.804$ V, le facteur de forme $FF = 82.14\ \%$ et le rendement de conversion $\eta = 23.54\ \%$. Ces résultats prouvent que la cellule en ZnS est la meilleure.

Par la suite nous avons étudié l'effet des deux couches ZnS et CIGS sur les performances de la cellule solaire (J_{cc}, V_{co}, FF, η). Nous sommes alors intéressés au dopage et à l'épaisseur des couches en ZnS et CIGS pour voir leurs influences sur le rendement électrique de la structure.

En faisant varier le dopage la couche tampon ZnS de 10^{15} à 10^{18} et le dopage la couche absorbeur CIGS de 10^{15} à 10^{18}, un rendement optimal de 26.06% a été obtenu pour un dopage de 6×10^{17} cm^{-3} pour ZnS et 1×10^{18} cm^{-3} pour CIGS.

Et en faisant varier l'épaisseur de la couche tampon ZnS de 10 à 50 nm et l'épaisseur de la couche d'absorbeur CIGS de 1 à 4 µm, un rendement optimal de 26.82% a été obtenu pour une épaisseur de 25 nm pour ZnS et 4 µm pour CIGS.

En prenant une structure qui combine les paramètres optimaux (épaisseur et dopage) de chaque couche, nous avons pu atteindre un rendement de conversion électrique de 26.82% avec un facteur de forme de 85.37%.

Les paramètres optimums de la structure optimale obtenus par notre simulation pour la couche tampon ZnS et la couche absorbeur CIGS sont présentés dans le tableau V suivant.

ZnS		*CIGS*		η (%)	*FF* (%)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)
N_d (cm^{-3})	*Epaisseur* (nm)	N_a (cm^{-3})	*Epaisseur* (µm)	26.82	85.37	0.881	35.64
6×10^{17}	25	1×10^{18}	4				

Tableau V : Paramètres optimum ayant donné η=26.82 %.

Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure ZnO/ZnS/CIGS et de montrer l'impact de la couche ZnS/CIGS sur les performances du dispositif en fonction du rôle de chacune d'elle.